

EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut



Kuido Kangur

**LÜHIKESTE KRUUVIAIADE KANDEVÕIME JA
KÄITUMISE UURING**

**INVESTIGATION OF BEHAVIOR AND BEARING CAPACITY
OF SHORT HELICAL PILES**

Magistritöö
Maaehituse õppekaval

Juhendajad: lektor Villu Leppik
doktor Mait Mets

Tartu 2017

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Kuido Kangur		Õppekava: maaehitus	
Pealkiri eesti keeles: Lühikeste kruvivaiade kandevõime ja käitumise uuring			
Lehekülgi: 136	Jooniseid: 36	Tabeleid: 14	Lisasid: 2
Osakond:		Maaehituse osakond	
Juhendajad:		Lekt. Villu Leppik; Dr. Mait Mets	
Kaitsmise koht ja kuupäev:		Tartu, 2017	
<p>Käesolev töö uurib traditsioonilistest kruvivaiadest väiksemate vaiade tõmbekandevõimet laboritingimustes liivapinnases. Lisaks uuritakse vähemal määral survekandevõimet ning hinnatakse arvutuslike meetodite kasutusvõimalusi.</p> <p>Töö eesmärk on uurida katseliselt kuidas mõjutab vaia labade diameeter kandevõimet, kuidas töötab kaasa maapind vaiale jõudu rakendades. Lisaks uuriti kirjandust ning prooviti leida sobilik arvutusmeetod, mille tulemus ühtiks testitulemustega. Katsed viidi läbi üheksa erineva katsekehaga. Kokku sooritati kolm katseseeriat, esimene neist kohevas pinnases tõmbele, teine tihedas pinnases tõmbele, kolmas tihedas pinnases survele. Katsed sooritati Eesti Maaülikooli ehituslaboris.</p> <p>Tulemused näitasid et pinnase korralik tihendamine on ülimalt oluline, suurendades kordades vaia kandevõimet. Kahe labaga vaiad olid sarnase või halvema kandevõimega kui ühe labaga vaiad, tõenäoliselt tingitud labade väikesest vahest. Tõmbekandevõime 10 kN ületati vaiaga, millel tüve diameeter 25mm ja laba diameeter 100mm. Kirjanduses uuritud arvutusvalemid osutusid kõik ebausaldusväärseks antud mõõtmetega vaiade arvutamiseks.</p>			
Märksõnad: kruvivai, lühike, tõmbekandevõime, survekandevõime, maapind			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of master thesis	
Author: Kuido Kangur		Õppekava: maaehitus	
Title: Investigation of behavior and bearing capacity of short helical piles.			
Pages: 136	Figures: 36	Tables: 14	Appendices: 2
Department:		Rural Engineering	
Supervisors:		Lect. Villu Leppik; Dr. Mait Mets	
Place and Date		Tartu, 2017	
<p>This master's thesis studies the load bearing of helical piles under tension that has smaller dimensions than traditional piles in laboratory environment. In addition, compressive capacity is also being analyzed and different calculation methods evaluated.</p> <p>The purpose of this thesis is to investigate how the diameter of the helix plate affects bearing capacity as well as how soil acts when force is being applied to the subject. Furthermore, relevant literature on the subject studied in pursuit of finding a suitable method that matches test results. The tests were carried out with nine different test subjects. A total of three test series were performed. In the first series, pile capacity under tension in mildly consolidated soil was investigated, second series was similar with the exception of having properly consolidated soil. In the third and final series, the compressive capacity in properly consolidated soil was studied. Tests were carried out in Estonian University of Life Sciences' structural laboratory.</p> <p>Test results illustrated that proper consolidation is extremely crucial and increases the load capacity drastically. Piles with two helices had the same or worse load bearing capacity that piles with one helix. The reason for that lays in insufficient spacing of the helices. Tension capacity of 10 kN was surpassed with screw pile with shaft diameter of 25mm and helix diameter of 100mm. All the methods studied in literature review were proven to be ineffective for designing piles with similar dimensions.</p>			
Märksõnad: helical pile, short, load bearing, tension, compression, soil			

Sisukord

Sisukord.....	4
Sissejuhatus	6
1. Teemaalase kirjanduse ülevaade	8
1.1. Lühülevaade ajaloost ning kasutamisest tänapäeval.....	8
1.2. Tõmbekandevõime.....	11
1.3. Survekandevõime.....	20
1.4. Väändeseose meetod ja CPT.....	24
1.5. Kandevõime meetodite võrdlus	26
2. Laboratoorsete katsete materjalid ja metoodika	30
2.1. Katsetel kasutatud pinnas.....	30
2.2. Katsekehad	31
2.3. Tõmbekatse katseseade	32
2.4. Survekatse katseseade	35
2.5. Katseplaan.....	35
2.5.1. Vaiade maasse süvistamise plaan	35
2.5.2. Vaiade katse ettevalmistus.....	36
2.5.3. Vaia tõmbekatse	37
2.5.4. Vaia survekatse.....	37
2.6. Katsetulemuste mõõtmine.....	38
3. Katsetulemused.....	41
3.1. Tõmbekatse tulemused kergel tihendamisel	41
3.2. Tõmbekatse tulemused tihedas pinnases	43

3.3.	Survekatsetulemused tihedas pinnases	45
3.4.	.Maapinna kaasatöötamise sõltuvus vaia labast.....	47
4.	Järeldused, arutus, tulemuste võrdlus	54
4.1.	Tõmbekandevõime võrdlus teoreetiliste meetoditega	54
4.2.	Survekandevõime võrdlus teoreetiliste meetoditega	56
4.3.	Labadeta vaiade kandevõime võrdlus teoreetilise meetodiga.....	59
4.4.	Väändeseos	60
5.	Kokkuvõte	64
	Tänuavaldused	65
	Summary.....	66
	Viidatud allikad	68
	Lisad	72

Sissejuhatus

Ehituskulude kokkuhoidmiseks ning ressursside mõistlikuks kasutamiseks on vaja leida igale ehitisele võimalikult optimaalsed lahendused alustades vundamendist ja lõpetades katusega. Hästi läbimõeldud lahendused mõjuvad positiivselt ettevõtte majanduslikule seisule ning ei jäta ebavajalikult suurt ökoloogilist jalajälge.

Nendest põhimõtetest lähtudes tahetakse pidevalt leida võimalikult lihtsat ning töötavat vundamendilahendust kergetele hoonetele ja rajatistele, mille mass on väike, kuid vastu tuleb võtta suured muutuvkoormused nagu tuul ja lumi. Kergete hoonete all saame käsitleda ehitisi, mis on kaetud kerge kattematerjaliga nagu PVC, seetõttu on hoone kandekarkass lihtsam ja omakaal vähene, domineerivaks on muutuvkoormused. Selliseid hooneid rajatakse tihti suurte laopindadena, mis tähendab tihti suuri sildeid ja avasid. Sellega kaasneb tuulekoormus katusel maapinna poolt, ehk vundamendid peavad suutma vastu panna ka tõstekoormusele.

Lõputöö tugines Eesti ehitusfirma AS Maru huvile rajada just sellised hooned võimalikult lihtsale vundamendile, mida oleks vajaduse korral võimalik ka kiiresti eemaldada. Üheks variandiks sellise vundamendi konstrueerimiseks on kruvivaiad, mis ei ole Eestis eriti populaarsed, küll aga on neid kasutatud rohkem kui sajandi vältel mujal maailmas. Kruvivaiu on viimase paarikümne aasta jooksul ka uuritud ning katsetatud, kuid nende mõõtmised on alati olnud kordades suuremad selles lõputöös fokuseeritud vaiadest.

Magistritöös sooviti leida vastused järgmistele küsimustele:

- Kuidas mõjutab vaialabade diameetri suurendamine kaasa vaia kandevõimele?
- Kuidas mõjutab vaialabade arv kaasa vaia kandevõimele?
- Milline vai suudab liivapinnases laboritingimustes vastu võtta koormust 10kN?
- Kuidas töötab pinnas kaasa vaia kandevõimele?

Küsimuste lahendamiseks läheneti probleemile nii teoreetiliselt kui katseliselt. Teoreetilise poole eesmärk oli uurida kirjandust ning leida sealt olulisim info ning võimalused läheneda asjale enne kui üldse midagi maasse puurima peaks. Samuti uuriti kruvivaide ajalugu, et paremini mõista nende kasutusvõimalusi ning piiranguid. Praktilises pooles sooritati reaalsed katsed eritellimusel valmistatud katsekehadega laboraatorsetes oludes. Eesmärk oli saada tulemused, mis näitaksid vaia käitumist pinnases reaalsetel koormuste rakendamisel. Uuriti kandevõimet ning maapinna liikumist.

1. Teemaalase kirjanduse ülevaade

1.1.Lühiülevaade ajaloost ning kasutamisest tänapäeval

Esimest kruvivaia meenutavat seadeldist kasutati tööriistana, mitte vundamendina. Tegemist oli puitpostiga, mille ümber kinnitati spiraalis metallist laba. Saadud tulemus keerati seejärel maasse käsitsi ning eemaldati, eesmärgiga saada maasse auk. Tekkinud ava täideti algeliste segudega, mida kasutati kergemate hoonete vundamendiks. [1]

Terasest kruvivaia leiutajaks peetakse Alexander Mitchelli (1780-1868), kes oli Iiri ehitaja ning kivitootja. Esmalt leidis algeline kruvivai kasutust laevade ankurdamiseks Londoni sadamas. Mitchelli'le tuli idee kasutada sarnast konstruktsiooni rannaäärsete ehitiste vundamendina kohas kus pinnas oli pehme ning ehitada tuli ka madalas vees. [2]

Esmaseks katseks püstitada ehitis kruvivaivundamendile oli Maplin Sands majakas aastal 1838. Projektiga aga kaasnes ebausku vundamendi stabiilsusesse ning ehitus jäeti kaheks aastaks seisma, et sooritada uuringuid enne majaka peale ehitamist. [3]

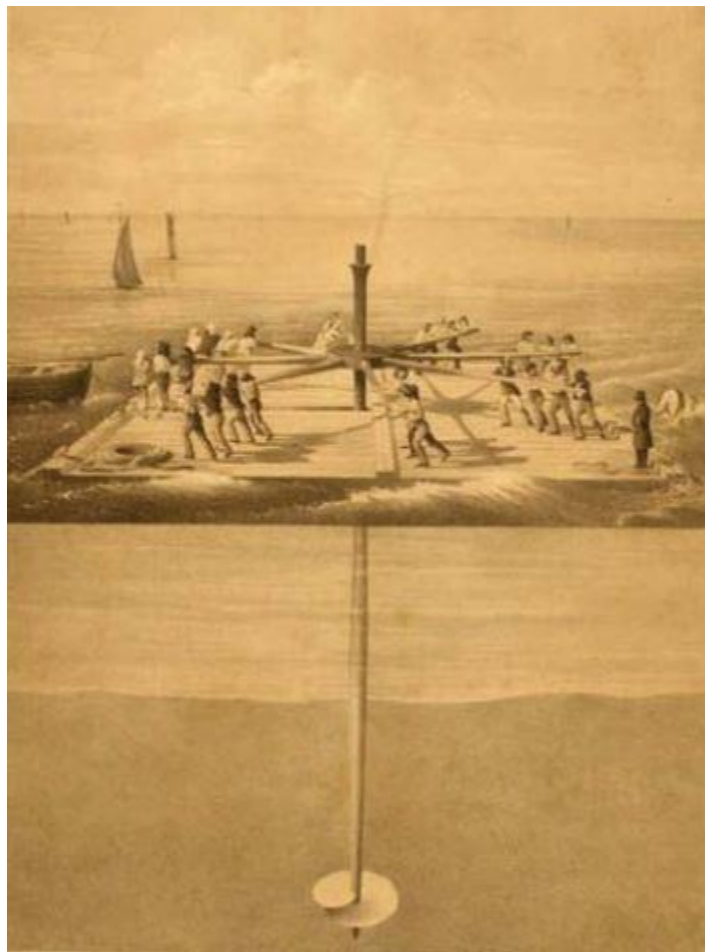
Ajal mil Maplin Sands projekt ootele pandi, kiideti heaks teine projekt Morecambe lahes, Lancashire's Inglismaal, kus ehitati terasest sõrestikuga Wyre majakas, mis toetus kruvivaiaidele. Sellest sai esimene reaalselt valminud ehitis sellist tüüpi vundamendiga. [4]

Wyre majakas rajati seitsmele terasest vaiale. Kuus vaia moodustasid kuusnurkse põhja, lisaks üks vai kuusnurga keskele. Vaiad oli 4,88m pikad, läbimõõduga 12,7 cm ning labaga 0,91m, mis asus tüve otsas. Kõik vaiad paigaldati väikese kalde alla, peale keskmise, mis süvistati sirgelt ning veidi sügavamale. [5]

Alexander Mitchell tegi 1837. aastal ettepaneku kasutada Maplin Sandsi majakaprojektis vundamendina kruvivaiaid. Selleks ajaks olid sooritatud geoloogilised uuringud, mis näitasid et kuigi paari meetri ulatuses on pinnas väga pehme, asub sügavamal pinnasekihtides hea kandevõimega liiva ja möll. Maplin Sands majaka vundamendi ehitusel

kasutati üheksat Staffordshire terasest valmistatud vaia. Iga vaia pikkuseks oli 7,9m, läbimõõt 12,7cm ning üks laba vaia kohta diameetriga 1,22m. Töö viljakus oli keskmiselt ühe vaia süvistamine päevas. [6]

Ajal mil Maplin Sands vundamenti paigaldati, tuli ehitamiseks konstrueerida parv, kuna tööd oli vaja teha madalas vees. Parve ruudukujulise külje pikkuseks sai 10 meetrit, ühelt küljelt jooksis parve keskele 61 cm laiune pilu, läbi mille toimus vaia laba juhtimine läbi parve pinnasele. Alus ankurdati pinnasesse ning vaia külge monteeriti kaheksa palki, mida lükates ümber vaia telje süvistati varras pinnasesse (Joonis 1.1). Kokku töötas vaiade süvistamiseks objektil umbes 40 meest. [3]



Joonis 1.1. Maplin Sands vundamendi vaia süvistamine parvelt.

Enne vundamendi tööde algust viidi läbi ka eeltöö ja planeerimine, millega seati paika vaia parameetrid ning kohad kuhu süvistada. Pinnase testimiseks kasutati 9,14m pikkust, 3,18cm diameetriga vaia, mille tippu paigaldati spiraalis 15,24cm diameetriga laba. Vai süvistati

sellele kinnitatud hoobadele, mille peale ehitati ka laudadest piisava kandevõimega platvorm 12 mehe jaoks. Vaiast pisut kaugemale rammiti maasse ka tavaline pulk, mille ülemine ots jäeti samale tasapinnale vaia otsaga, eesmärgiga asetada vaia ning pulga peale lood mõõtmaks vajumist. 12 meest ning platvorm nende hoidmiseks avaldasid vaiale koormust 1 tonn, kuid sellele järgnev loodimine avaldas, et arvestatavat nihet ei tekkinud. [3]

Katsetest tehti järeldusi, et kui kruvivai 15,2 cm diameetriga suudab kanda 1 tonni, siis 1,2 m läbmõõduga suudab kanda vähemalt 64 tonni, arvestades nende kahe diameetri ruutude väärtusi. Eksperiment sel ajal polnud loomulikult väga teaduslik, vaid prooviti kandevõimet arvata. Tuleb välja et kogu töö ja teadus mida selle projektiga tehti, ei olnud väga ebatäpne ning ei erine palju sellest kuidas asju tänapäeval tehakse. [2]

Maplin Sands ja Wyre majakate edu tõttu ehitati järgnevatel aastatel mitmeid sarnasi kruvivaiadest vundamendiga ehitisi. Mõned kuulsamad neist on Belfast Lough, Gunfleet ja Dundalk Bay. Kuigi Maplin Sandsi vundament ehitati täiesti vertikaalselt, tehti enamuse projekte edaspidi väikese kaldega, et suurendada vastuvõtlikust horisontaalkoorumusele. Lisaks majaka tüüpi ehitistele leiti kruvivaiadele rakendust ka kaide ehitamisel. [2]

Esimesed kommertskasutuseks mõeldud vaiad arendati 20. sajandi alguses, mille ajendiks oli vajadus kinnitada trosse, mis hoiavad kõrgeid maste stabiilsetena. Selliseid vaiu kasutas peamiselt elektritööstus. Areng tehnikas võimaldas vaiade kinnitamiseks kasutada erinevaid pinnaseid ning minna sügavamale kui varem. [7]

Mootori ning elektriliste tööriistade kasutuselevõtt 1950ndatel tähendas märkimisväärset hüpet vaia tõmbekandevõime arengus. Suudeti tagada vaia tõmbekandevõime kuni 16 tonni ning järgmisel kümnendil juba kolmekordistati see. Tõmbekandevõime suurendamise järel hakati otsima võimalusi vaivundamendi kasutusotstarbe laiendamiseks. 1970ndatel avastati vaia väände ja kandevõime vaheline seos, mis annab kruvivaiadele suure plussi. Sajandi viimasel kümnendil saab vaivundament ka heakskiidu kasutamiseks väga erinevateks eesmärkideks, näiteks vundamentide tugevdamiseks, uusehitisteks, pinnast hoidvate seinte ankurdamiseks jpm. [8]

Tänapäeval kasutatakse vaiade süvistamiseks puurimisseadeldist, mis ühendatakse kas traktori või mõne muu masina külge, mis võimaldab selle kasutamist. Vai keeratakse maasse, samal ajal kergelt survestades. Kruvivai kandevõimet saab pidevalt jälgida väände ja

kandevõime seose abil. Vaia tüve saab vajadusel ka pikendada, ehk süvistada on võimalik nii pikalt kui vaja, et saavutada eesmärgipärane kandevõime, eeldusel et pinnas seda lubab. Vaia-võib kasutada olevalt parameetritest ja pinnasest nii surve-, tõmbe-, kui ka külgsurve kandmiseks. Vundamenti saab teha kiiresti ning see on koheselt valmis kandmiseks. Tänapäevased mitme labaga vaiad suudavad tagada kandevõimet üle 450kN. [9]

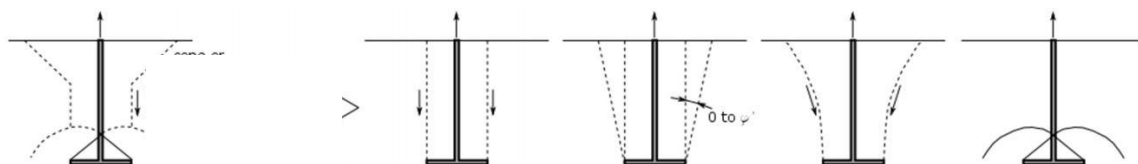
1.2.Tõmbekandevõime

Kandevõime määramiseks saame eristada kahte liiki meetodeid: otsesed ning teoreetilised. Otsene meetod kandevõime kalkuleerimiseks tähendab, et kandevõimet võib leida teadmata pinnase geotehnilisi parameetreid. Mõnel juhul saab kandevõime kätte rakendades otsestel meetoditel osavarutegureid. Kandevõimet saab arvutada nii tõmbele kui survele. [10]

Kruvivaiade puhul on töötav mehhanism tihti ebaselge ning inseneridele alati probleeme valmistanud. Seetõttu on viimase 20 aasta jooksul avaldatud palju teooriaid ning arvutuspõhimõtteid avaldamaks vundamendi kandevõimet. [11]

Kruvivaivundamente saab jagada madalvundamendiks ja sügavvundamendiks. Vundamendi tüüp sõltub vaia süvistussügavuse ning laba diameetri suhtest H/D . Üldiselt arvestatakse sügavuse ja laba laiuse piirväärtuseks 5, väärtused alla selle näitavad, et tegemist on madala vundamendiga, väärtused üle viie, et tegu sügavvundamendiga. Olenevalt arvutusmetoodikast võib H/D väärtus kõikuda liivapinnases 3 ja 7 vahel. Madalvundamendi puhul areneb nihke ületamine maapinnani välja, sügavvundamendi puhul toimub pinnase purunemine labade ümber, kuid ei laiene maapinna jooneni. [12]

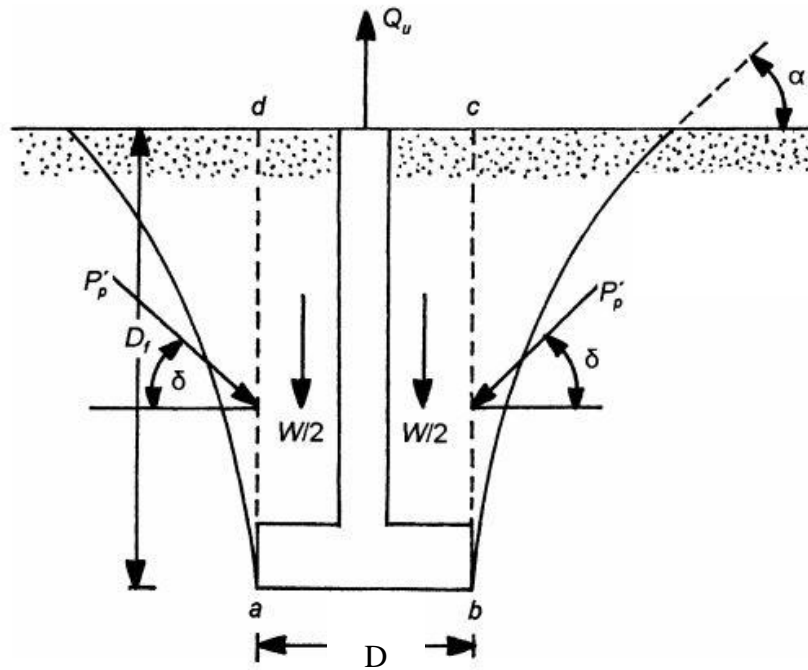
Enamus arvutusmeetodeid, mida kasutatakse projekteerimiseks, on lihtsustatud analüütilised või ka otsesed meetodid. Ühe plaadiga teooriad saab üldistades jagada neljaks meetodiks (Joonis 1.2) – koonuse meetod, nihke meetod, kõverjoone meetod, tühimike laienemise meetod. [13]



Joonis 1.2. Erinevatel teooriatel põhinevad pinnase liikumise võimalused. Vasakult paremale: üldistatud pinnase mõju, nihke meetod, koonuse meetod, kõverjoone meetod, tühimike liigutamise meetod. [14]

Üldiselt tähendab kandevõime arvutus kahe komponendi arvestamist – liigutatava maapinna ja vundamendi omakaalu ning hõõret liigutatava pinna ning seda ümbritseva pinna vahel. Koonuse ja kõverjoone vahe meetodi vahe on selles, et kõverjoon ei arvesta pinnase mõju plaadi äärest maapinnani liikudes konstantse nurga all, vaid see muutub pidevalt. Arvutuse lihtsustamiseks siiski asendatakse kõverjoon tihti sirge joonega. Nihke meetod arvestab laba kohal olevat maapinna liikumist sirge joonena. Tühimike liigutamise meetod vaatleb pinnast kui pinnases olevate tühimike kokku surumist ning seega pinnase eemale lükkamist. [15]

A. Balla kasutas arvutusmodeli leidmiseks katseid laboris kui objektidel. Tuginedes katsetulemustele leidis ta, et madala ringikujulise geomeetriaga vundamentide puhul ei teki pinnasenihe sirgelt plaadi kohal olevas pinnases, vaid pinnase kaasatöötamine laieneb kuni maapinnani. [16]



Joonis 1.3. Pinnase töötamine tõmbel. Kõverjooned a ja b iseloomustavad lehtrikujulist pinnase nihet. [12]

Pinnas töötab kaasa lehtrina, mille tipp on laba otstes ning laieneb üles minnes, mitte vertikaalselt sirge silindrina plaadi kohal (Joonis 1.3). Kande võime arvutatakse summana kahest komponendist. Esimese komponendi moodustab vaia kaal ning pinnase kaal, mida liigutatakse. Teine komponent sõltub hõõrdest, mis toimub kaasa töötava pinnase hõõrdest ümbritseva pinnaga. Balla koostas lihtsustamise mõttes valemi kus arvestas pinnase ning vundamendi omakaalu võrdseks. [16]

Kande võime valem Balla järgi avaldub kujul: [16]

$$Q_u = H^3 \cdot \gamma \left[F_1 \left(\varphi, \frac{H}{D} \right) + F_3 \left(\varphi, \frac{H}{D} \right) \right] \quad (1.1)$$

kus D on vaialaba läbimõõt m;

γ – pinnasetihedus kN/m³;

H – vaia süvistamissügavus m;

φ – pinnase sisehõõrdenurk kraadides;

F_1, F_3 – ühikud, mis pärinevad A. Balla graafikutelt, ning sõltub laba diameetri ja sügavuse suhtest ning pinnase sisehõõrdenurgast.

A. Ghaly esitas sarnase põhimõttega lahenduse, kus üksiklaba tekitab koonusekujulise pinnasemõju, oma uurimuses. Vaadeldi üksiklabaga vaia liivapinnases ning tehti kindlaks, et tõstejõu väärtus sõltub liigutatava pinnase mahust ning tekkivatest hõõrdejõududest koonuse ja ülejäänud maapinna piiril. Tuleb eristada ka sügavat ja madalat vundamenti. Sügaval vundamendil on vajalik juurde arvestada vertikaalne pinnasesurve. [17]

Üksikvaia arvutamiseks esitas Ghaly võrrandi, kus tegurit N ei arvesta madalvundamendil: [17]

$$Q_u = P_p + W + N, \quad (1.2)$$

kus P_p on hõõrdejõud töötava koonuse ja ümbritseva pinna vahel kN;

W – töötava pinnase(koonuse) kaal kN;

N – maapinna vertikaalsurvejõud kN.

Meyerhofi ja Adamsi vundamendi kandevõimet, mida peetakse üheks täpseimaks variandiks on mugandatud ka üksikvaia jaoks, nii risküliku kui ringikujulise geomeetriaga vaiadeks. Siin on arvestatud pinnase töötamist koonusena, ehk pinnase hõõrde joon on arvestatud sirgelt, mille otspunkt on vaia laba otstes ning liigub nurga α all laiemaks. Nurk sõltub mitmest faktorist nagu pinnasetihedus ja pinnase hõõrdenurk. [18]

Üksikvaia arvutamiseks mugandatud valem on kujul: [18]

$$Q_u = \frac{\pi}{4} D^2 H \gamma + \frac{\pi}{2} \left[1 + m \left(\frac{H}{D} \right) \right] \gamma D H^2 K_u \tan \varphi, \quad (1.3)$$

kus K_u on pinnase külgsurvetegur liivpinnases tõmbel;

m – pinnase hõõrdenurgast sõltuv koefitsient;

ülejäanud tähised on juba varasemalt defineeritud.

Võlvide teooria uurib tühimike laienemist materjalis. Teooria põhimõte on, et mingi hulk pinnast mida saab seostada töötava pinnasena kandevõime piiril, on see pinnas millest sõltub kandevõime. Oluliseks osaks sealjuures on pinnases olevad õõnsused, mis suruvad vastu

pinnaseosakesi. Vesici teooria simuleerib nende õõnsuste käitumist et analüüsida vundamendi kandevõimet. [19]

Vesici uurimusele tuginedes on välja tulnud valemiga: [20]

$$Q_u = A_h \gamma H F_q, \quad (1.4)$$

kus A_h on laba pindala m^2 ;

F_q – väljatõmbetegur (ing. k. *breakout factor*);

ülejäanud tähised on juba varasemalt defineeritud.

Saeedy teooria vaatlleb töötava pinnase kuju kui logaritmilist spiraali, mille kaar on pinnaks, kus tekib hõõre. Madalates vundamentides jõuab kaar maapinnani välja, sügavates ei pruugi see nii olla. Teadlase arvates toimub vundamendile tõmbejõudu rakendades laba kohal oleva pinnase jooksev tihendamine, mille tulemusena suureneb hõõrdejõud ning sellega ka kandevõime. Selle nähtuse valemisse toomiseks võttis ta kasutusele teguri μ . [21]

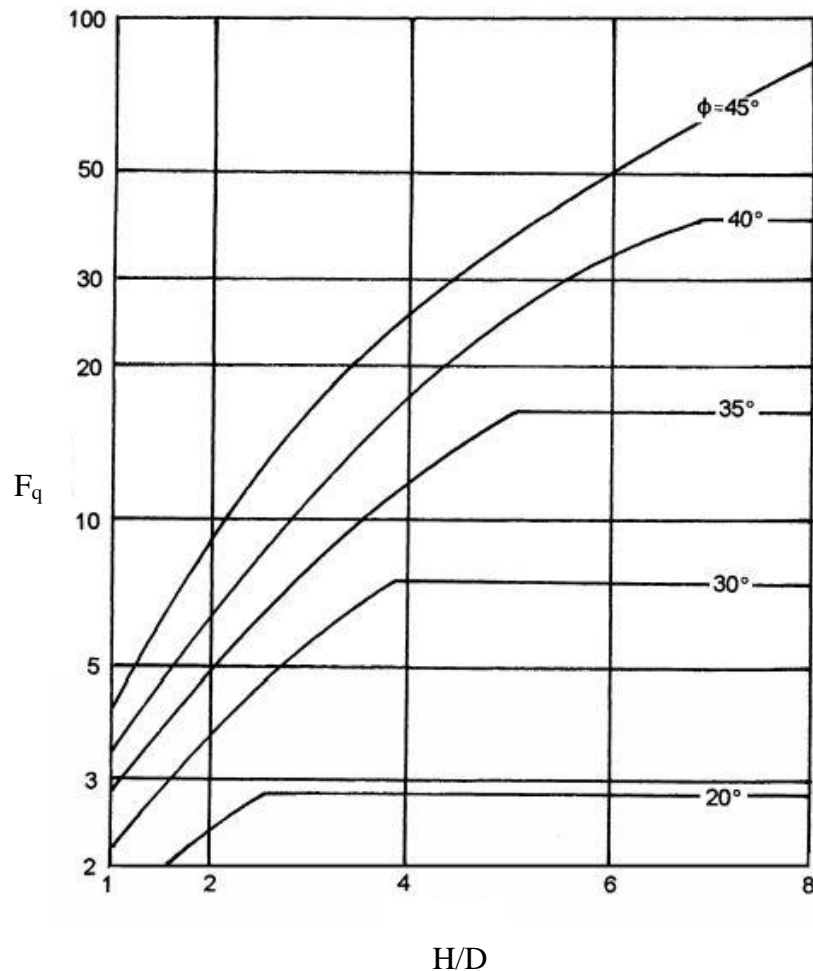
Tõmbekandevõime Saeedy teooriat põhjal on: [21]

$$Q_u = F_q \gamma A_h H \mu, \quad (1.5)$$

kus μ on pinnasetihedusest sõltuv tihendustegur;

ülejäanud tähised on juba varasemalt defineeritud.

Üldiselt kannavad tõmbekandevõime teooriad arvutusvalemities väga olulist väljatõmbetegurit F_q (ing.k. *breakout factor*). Vaadates näiteks Saeedy, Vesici ja Meyerhof-Adamsi valemit, näeme et see tegur korrutades läbi laba pindala, sügavuse ja pinnasetihedusega annab vaia kogukandevõime. Teguri leidmiseks on igal arvutusmeetodil omad tabelid F_q väärtuse leidmiseks (Joonis 1.4), mis on juurutatud katselistel meetoditel ning see sõltub vaialaba sügavuse ja laiuse suhtest ning pinnase sisehõõrdenurgast. [12]



Joonis 1.4. Väljatõmbeteguri F_q väärtused Meyerhof-Adamsi tabeli järgi. [12]

Konkreetsel meetodil lähenedes on arvutamiseks tuletatud mitmeid valemeid, sõltuvalt sellest kuidas on kandevõimele lähenetud, kas kandevõimet on vaja arvutada survele või tõmbele, samuti kas tegemist on nidusa või mittenidusa pinnasega. [22]

Kandevõime teoreetiliseks arvutamiseks mitme labaga vaiade korral on kaks enamlevinumat meetodit silindri nihke meetod (ing. k. *cylindrical shear method*) ja üksiku laba meetod (ing. k. *individual bearing method*). Need teoreetilised meetodid on samuti arendatud tuginedes geoloogilistele printsiipidele. Peamine eesmärk on hinnata vaia kandevõimet hoone või rajatise planeerimisjärgus. Üksiku laba meetodit saab kasutada ka ühe labaga kruvivaiade kandevõime analüüsimiseks. [23]

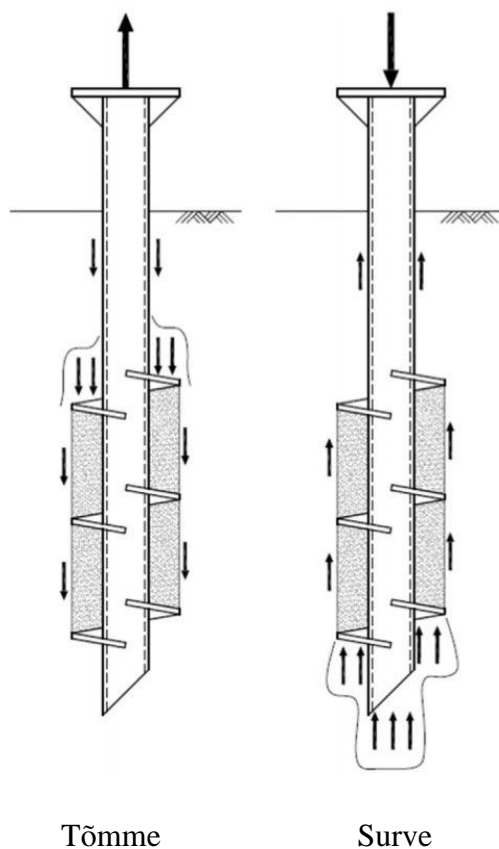
Mitme labaga kruvivaiade jaoks on väga tähtis vaiatüve ümber olevate labade korrektne samm. Piisav vahe on vajalik et ei kattuks erinevate labade töötsoonid, vähendades sellega kandevõimet. Kirjanduse ülevaade loob kirju pildi, mis see korrektne samm olema peaks.

Üldiselt peetakse 3-4 kordset laba diameetrit vajalikuks labade vaheks, et mõlemad labad saaksid vabalt oma töötsoonis pingeid vastu võtta. [12]

Silindri nihkejõu ja üksiku laba meetod nõuab teadmisi pinnase parameetritest, kuhu ankur paigaldatakse. Need parameetrid leitakse tavaliselt ehitusplatsil ning laboris tehtud testidest, kus on tihti vaja ka subjektiivset arvamust ning inseneri hinnangut. Pinnaseproovide kvaliteet ning subjektiivsete hinnangute täpsus mõjutavad tulemusi. [24]

Silindri nihke meetod arvestab kõige ülemise ning alumise vaialaba vahel tekkinud silindri külgpindala ning selle liigutamisel tekkivaid hõõrdejõudusid külgneva pinnasega. Lisaks arvestatakse vastupanu, mida avaldab laba ise. Seetõttu on selle meetodi eelduseks see, et vaiatüvel on kinnitatud vähemalt kaks laba. [25]

Vaia kogukandevõime koosneb kolmest komponendist – vastupanu nihkejõududele mööda labade vahel tekkivast silindri pinnast, vaia laba kandevõimest ning hõõrdest mööda vaia tüve (Joonis 1.5). Sügavate vaiade puhul võib jätta tüve hõõrde arvestamata kuna see on võrdluses teiste komponentidega tühine. [26]



Joonis 1.5. Kruvivaiale jõudu rakendades tekib kolme liiki vastupanu.

Kandevõimet võib summeerida järgmiselt: [26]

$$Q_u = Q_{helix} + Q_{bearing} + Q_{shaft}, \quad (1.6)$$

kus Q_u on vaia kogukandevõime kN;

Q_{helix} – kandevõime nihkejõust labade vahel tekkiva silindri pinna ja maapinna vahel kN;

$Q_{bearing}$ – vaia labast tingitud kandevõime kN;

Q_{shaft} – vaia tüve hõõrdest tingitud kandevõime kN.

Arvutusvalemi tõmbekandevõimele nidusas pinnases silindri nihke meetodile tuginedes on välja töötanud Mooney, Rao ja Prasad ning see väljendub kujul: [27]

$$Q_{t,nidus} = S_f(\pi D L_c) C_u + A_h(C_u N_u + \gamma H) + \pi d H_{eff} \alpha C_u, \quad (1.7.)$$

kus S_f on labade sammu faktor;

d – ülemise vaialaba läbimõõt m;

L_c – ülemise ja alumise laba vahe m;

C_u – dreanimata pinnase surve kPa;

N_u – tõmbekandevõime tegur;

H_{eff} – vaia efektiivpikkus m;

α – hõõrdetegur;

ülejäätud tähised on juba varasemalt defineeritud.

Arvutusvalemi mittenidusas pinnases on kokku pannud Mitch ja Clemence järgnevalt [26]

$$Q_{t,mittenidus} = \frac{1}{2} \pi D \gamma (H_b^2 - H_t^2) K_s \tan \varphi + \gamma H A_H F_q + \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma K_u \tan \varphi, \quad (1.8)$$

kus N_q – pinnase sisehõõrdenurgast sõltuv kandevõime tegur;

K_s – pinnase külgsurvetegur;

H_t – ülemise vaialaba sügavus m;

H_b – alumise vaialaba sügavus m;

P_s – vaia tüve ümbermõõt m;

ülejäätud tähised on juba varasemalt defineeritud.

Adams ja Klym püstitasid 1970ndatel hüpoteesi, et iga vaialaba saab käsitleda iseseisvalt töötavana. Nagu silindri hõõrdejõu meetodi puhul, saab ka seda meetodit kasutada nii tõmbekui ka survekandevõime puhul. Survejõu puhul sõltub kandevõime laba mõõtmetest ning rikkumata pinnasest selle all. Tõmbel tuleb taaskord arvestada süvistamisest nõrgestatud pinda.

Ameerika Ühendriikides välja kasvanud globaalse korporatsiooni Hubbell Incorporated haru A.B. Chance Industries välja töötatud teooria näeb välja, et kogu vaia tõmbekandevõime on analoogne üksikute vaialabade kandevõime summaga. Hõõrde arvestamine vaia tüvele pole vajalik. Enne arvutamist on vaja tagada tingimus, et labad tuleb projekteerida piisava sammuga, et ei oleks labade kaasatöötava pinnase üle kattumist. [28]

Üldvalem antud meetodiga arvutamiseks näeb välja järgmine: [28]

$$Q_t = \sum A_h(9c + qN_q), \quad (1.9)$$

kus kõik tegurid on juba varasemalt defineeritud.

Tuginedes teadmistele pinnasekarakteristikute kohta, lihtsustas A. B. Chance Industries valemit, jagades selle kaheks eraldi valemiks – üks nidusa ja teine mittenidusa pinnase kohta. [28]

Lihtsustatud valemid tõmbele nidusas ja mittenidusas pinnases näevad välja järgmiselt: [28]

$$Q_{h,nidus} = A_h 9c \quad (1.10.)$$

$$Q_{h,mittenidus} = A_h q N_q, \quad (1.11.)$$

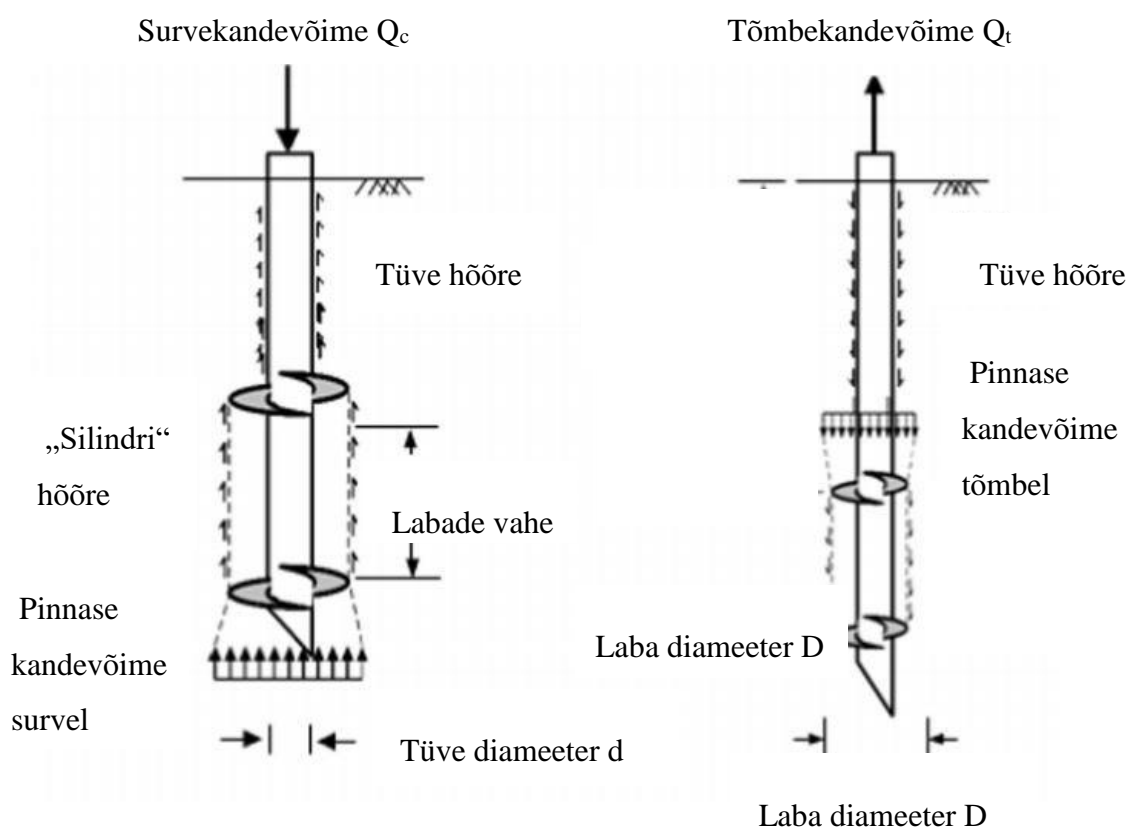
Chance valemit täpsustati 2009 aastal, kus lisati hõõrde mõju vaiatüvele, kuigi varem ei peetud seda oluliseks. M. H. Nasr leidis, et tagada täpsem kalkulatsioon, tuleks arvestada kõikide jõududega, mis töös on ning lisas valemile tüve hõõrde Q_{shaft} [29]

Valemi kuju lisatud tüve hõõrdega väljendub [29]

$$Q_t = Q_{shaft} + \sum A_h(9c + qN_q). \quad (1.12.)$$

1.3. Survekandevõime

Survekandevõime arvutamise teooria nii silindri nihke kui ka üksiku laba meetodil on sarnane tõmbekandevõime kalkulasioonile, arvestades kombinatsiooni labade kandevõimest ja pinnase hõõrdest (Joonis 1.6). Peamine erinevus siin on selles, et tõmmates töötab labade kohal olev pinnas, mis on pisut rikutud vaia süvistamisest, erinevalt survest, kus töötab laba all olev süvistamisest puutumata pinnas. Valemite jaoks tähendab see üldiselt mõningate tegurite välja vahetamist. [22]



Joonis 1.6. Kahe laba survekandevõime vaatlemise tööpõhimõtte silindri nihke meetodil ning võrdlus tõmbega samal meetodil. [30]

Vaiade arvutamiseks survele silindri nihke meetodil tuleb esmalt vahet teha, kas arvutatakse kandevõimet nidusas või mittenidusas pinnases.

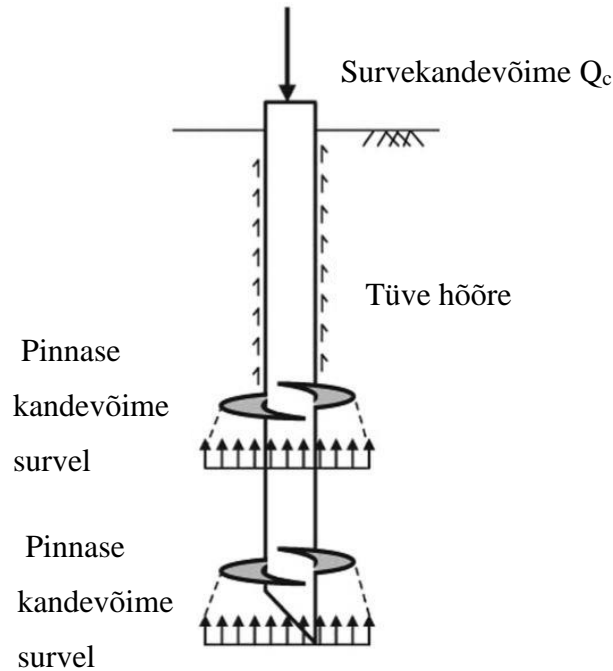
Survekandevõime arvutuseks nidusas pinnastes kehtib valem: [31]

$$Q_{c,nidus} = S_f(\pi D L_c) C_u + A_H C_u N_c + \pi d H_{eff} \alpha C_u \quad (1.13.)$$

Sama põhimõttega valemi kuju mittenidusates pinnastes väljendub: [26]

$$Q_{c,mittenidus} = \frac{1}{2} \pi D_a \gamma (H_b^2 - H_t^2) K_s \tan \phi + \gamma H A_H N_q + \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma K_s \tan \phi, \quad (1.14.)$$

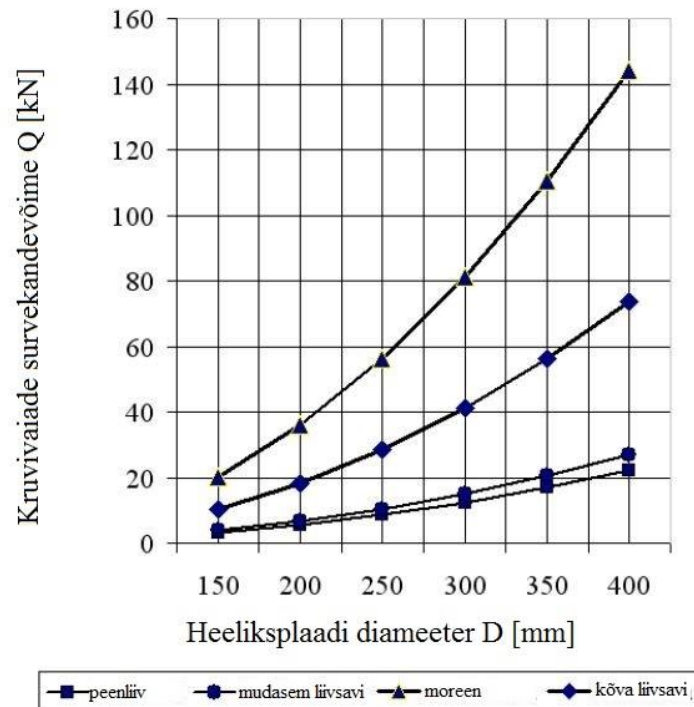
kus kõik tegurid on juba varasemalt defineeritud.



Joonis 1.7. Individuaalse laba meetod survekandevõimel. Sarnased jõud mõjuvad ka tõmbel, vastupidise suunaga. [32]

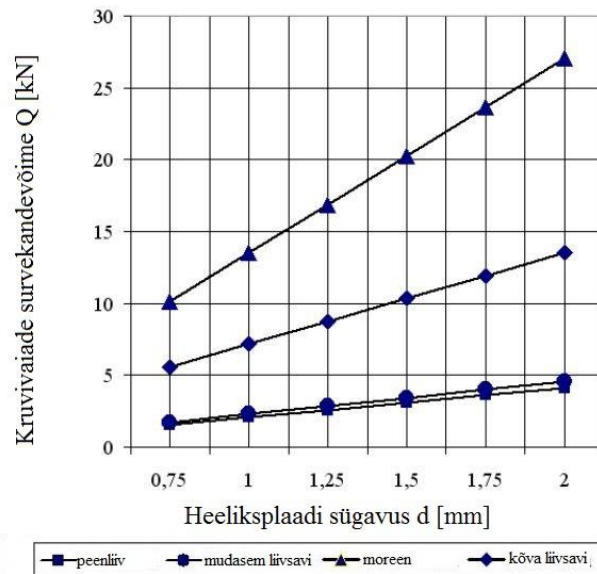
Individuaalse laba meetodit kandub üle ka survekandevõime arvutamiseks (Joonis 1.7). Surve puhul on pinnas süvistamise poolt rikkumata, mis tähendab paremat kandevõimet. Juurde saab arvestada ka kruviaia tüve diameetri. Mida sügavamal vai asub, seda lähedasemaks muutub vaia surve- ja tõmbekandevõime. [22]

2010. aastal viidi Riia tehnikaülikoolis läbi uurimus vintvaiade survetugevuse määratlemiseks. Sooviti teada saada kuidas erinevad tegurid mõjutavad vaia kandevõimet. Nendeks teguriteks olid vaialaba läbimõõt, vaia sügavus ning vaialabade arv. Samuti tehti katseid erinevates pinnastes vaatlemaks selle mõju. Katseid tehti vaiade survekandevõimele, kuid samad tegurid mõjutavad ka vastupidist jõudu, ehk tõmmet. [33]



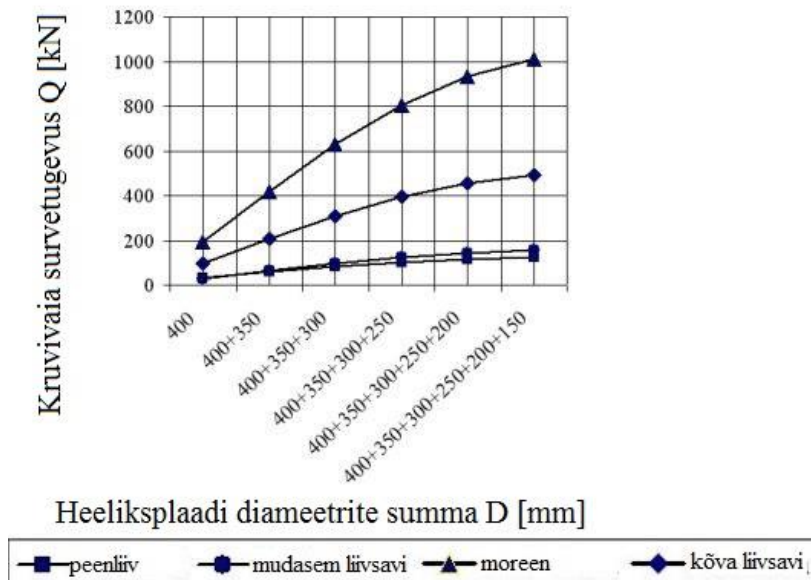
Joonis 1.8 Vaia survekandevõime erinevates keskkondades erineva suurusega vaialabade puhul, arvestades kõigi vaia sügavuseks 1.5m. [34]

Esmalt uuriti vintvaia laba diameetri suuruse olulisust kandevõimele. Katsekehad süvistati 1.5m sügavusele. Sooritati survetestid ning järeldati et kõigis pinnastes mängib laba suurus olulist rolli vaia kandevõimele. Kandevõime suurus laba diameetri kasvades ei suurene aga kõigis pinnastes samamoodi. Kõige rohkem suureneb kandevõime moreenpinnas, seejärel kõvas liivsavis, mudasemas liivsavis ja viimaseks liivpinnases (Joonis 1.8). [34]



Joonis 1.9. Vaia survekandevõime erinevate sügavustega. [34]

Järgmiseks vaadeldi vaia sügavuse mõju kandevõimele. Vaiade sügavused varieerusid 0.75 meetrist 2. meetrini, 25 cm sammudega. Tulemuseks lineaarne korrelatsioon kõikides vaadeldavates pinnastes. Kandevõime 2 meetri sügavusel on kaks korda suurem kui ühe meetri sügavusel. Järeldati et mitme labaga kruvivaiade puhul kannab alumine rohkem(Joonis 1.9). [34]



Joonis 1.10. Vaia survekandevõime erinevate labade koosmõjul. [34]

Kruvivaia kandevõimet mõjutab oluliselt tüve ümber olevate labade arv. Siinkohal tuleb täheldada et plaatide arv ning mõõdud võivad olla väga erinevad kuid anda sarnaseid tulemusi (Joonis 1.10). Seega on äärmiselt mõistlik käsitleda iga vajadust vintvaia järgi erinevalt, arvestades ökonoomsust ja ratsionaalsust. Katseseeria sooritamisel kasutati USA firmakoodi “A.B.CHANCE”. Vaia survekandevõimel on oluline roll heeliks-plaadi diameetril, plaadi sügavusel ning plaatide pindala summalt. Katsetest saab järeldada et kuigi eri pinnastes on erinev kandevõime, muutub kandevõime mõne parameetri muutmisel kõigis pinnastes sarnaselt. [34]

Siledade, labadeta vaiade kandevõimet saab määrata löökkatsega kasutades selleks mehaanilist vasarat. Kandevõime määramiseks tuleb fikseerida objektile langeva raskuse kaal ja langemiskõrgus. Arvutuse sooritamiseks tuleb määrata ühest rammvasara löögist põhjustatud vaia vajum.

Arvutus tugineb Gersevanovi valemile ning on kujutatud järgmiselt: [35]

$$Q_u = \frac{\eta A_h}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4E_d}{\eta s_e} \cdot \frac{m_1 + 0,2m_2}{m_1 + m_2}} - 1 \right] \quad (1.15)$$

kus A_h on vaia ristlõikepindala m²;

m_1 – vasara kaal t;

m_2 – vaia ja kaitsepea kaal t;

s_e – vaja vajum ühest löögist (peab olema vahemikus 2-10mm) m;

E_d – löögienergia kNm;

g – raskuskiirendus, 9,81 m/s²;

η – vaia materjalist sõltuv tegur kN/m².

1.4.Väändeseose meetod ja CPT

Üks enim kasutatavaid otseseid meetodeid on koonuse läbistavustest CPT(ing. k. *Cone penetration test*). Test näeb välja selline, et kasutatakse koonusekujulise tipuga silindrit (penetromeetrit), mis on ühendatud puurvarda otsa ja surutakse maasse konstantse kiirusega, lisades süsteemi vardaid nagu vaja. Saadakse pinnase vastupanust tingitud lugemid koonuse maasse vajumisel. Testitulemused näitavad tabelit koonuse otsas tekkivast pingest, mis on

tingitud pinnase eemale lükkamisest ning ka hõõret, mis tekib varda pinnal. Lisaks saab jälgida ka temperatuuri muutust ning varda vertikaalsust. Neid tulemusi saab kasutada ka eeltööks vaialuse kalkulasioonil. [36]

Populaarne variant kandevõime määramiseks ehitustööstuses on väändeseose meetod. Väändeseose meetod on leitud töö käigus 1970ndatel. Lahendus leiab laia kasutust objektidel vaia kandevõime kinnitamiseks, või selle kontrollimiseks paigalduse käigus. Meetod kirjeldab süvistamisest tekkivat vastupanu kui vahendit mõõtmaks tekkivat pinnase nihketugevust, mille saab seostada kandevõimega. [23]

Väändekatses mõõdetakse väändemoment, mida vai suudab vastu võtta olles täielikult või peaaegu täielikult süvistatud eesmärgipärasele sügavusele. Seda momenti tuleb korrutada korrelatsiooniteguriga, mis sõltub vaia parameetritest. Antud variant kandevõime arvutamiseks on loodud töö käigus, mitte tuginedes geoloogilistele printsiipidele. Sellest hoolimata on antud meetod on kõige populaarsem vaia kandevõime prognoosimise vahend ning seda on kasutatud rohkem kui 40 aastat alates selle meetodi tuletamisest 1970ndatel. [25]

Antud meetodiga saab kalkuleerida vaia kandevõimet valemiga: [23]

$$Q_u = K_T \cdot T, \quad (1.16.)$$

kus K_T on väändetegur;

T –vaia väändemoment Nm.

Vaia väändemomendi leidmiseks kasutatakse spetsiaalset vaiavõtit, mis mõõdab võtmele osutatud vastupanu. Korrektne tulemus on viimane näit, millega ületatakse võtme vastupanu. Vaia näit salvestatakse njuutonmeetrites.

Hoyt ja Clemence leidsid et tegur K_T sõltub peamiselt vaia tüve diameetrist. Nende uurimusest tuli välja et soovituslik väärtus antud tegurile on 33 m⁻¹ kõigi alla 89mm läbimõõdus tüvedega vaiadele, mis on oma geomeetriaalt ringikujulised. K_T väärtus kahaneb, mida suuremaks muutub vaia tüve diameeter. [25]

Vaia ning pinnase parameetreid arvestava teguri väärtused võivad erineda väga suurel määral, olenevalt uurimusest, kes neid tegi ning millised on katse parameetrid. Paljudel

krvivaiadega tegelevatel ettevõtetel ja korporatsioonidel on välja töötatud omad meetodid asjale lähenemiseks.

2009. aastal avaldatud raamatus „Helical Piles“ leiutati valemit, millega saaks määrata teguri K_T väärtus. Autor kasutas üle 300 testi tulemusi nii tõmbele kui ka survele, kasutades erinevate ettevõtete tulemusi. Valemi koostamiseks kasutati regressioonianalüüsi ning leiti parima sobivusega võrrand, millega leida tegurit K_T . [37]

$$K_T = \frac{\lambda_k}{d_{eff}^{0,92}}, \quad (1.17)$$

kus λ_k on sobivustegur $1433\text{mm}^{0,92}/\text{m}$;

d_{eff} – vaiatüve läbimõõt [mm].

Tulemusi kõrvutati ka Hoyt'i ja Clemence omadega ning leiti et tulemused jäävad samasse suurusjärku. Vaia tüved millega on tehtud võrdlus, jäävad 38-203 mm diameetri vahele. Lisaks leiti et teoreetiliselt peab K_T väärtus survekandevõime määramiseks olema umbes 10% kõrgem kui tõmbekandevõime arvutamiseks. [37]

1.5.Kandevõime meetodite võrdlus

R. M. Hoyt ning S. P. Clemence avaldasid aastal 1989 teadusartikli „Uplift Capacity of Helical Anchors in Soil“, kus võrdlesid erinevate meetoditega leitud vaia kandevõimeid kõrvutades need katse teel saadud tulemustega. Lisaks Hoyt'i ja Clemence'i enda andmetele vaadeldi ka andmeid kolmes publitseeritud kirjandusartiklites:

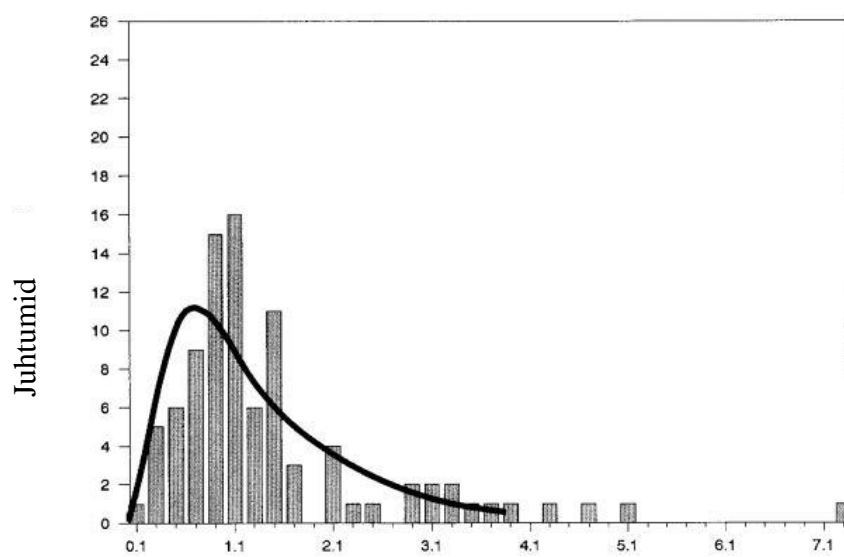
1. J.I Adams, T.W Klym „A Study of Anchorages for Transmission Tower Foundations“ Canadian Geotechnical Journal. Vol. 9, No. 1. 1972
2. S.P Clemence „The Uplift and Bearing Capacity of Helix Anchors in Soil, Vol. I, II, III. 1984
3. Dames, Moore „Pullout Tests on Multi-Helix Screw Anchors, Shacklefords, Virginia. A report prepared for Virginia Electric Power Company“ 1980

Kokki vaadeldi 91 katset, mis toimusid 24 erineval platsil. Esindatud olid savi-, möll-, liivapinnas. Pinnasekihtide arv testides varieerus 1st 10ni. Paljudel objektidel testiti erinevaid vaiu erinevatel sügavustel. Vaia sügavuse ja diameetri suhte arv ulatus 5.1st 134ni. Vaia süvistamisnurk kõikus 0 ja 50 kraadi vahel. Mitte ühtegi testi ei arvestatud ebaõnnestunuks, seega vaia käitumist saab vaadata puhtalt kui pinnase tugevuse poolt mõjutatuks. [25]

Vaadeldud kruvivaiade postid olid nii ringi kui ruudu kujulise läbilõikega viies mõõdus: 38mm, 45mm, 89mm ja 219mm ringikujulise geomeetriaga ning 51mm ruudukujulise geomeetriaga. Vaialabade arv varieerus kahest 14ni ning nende läbimõõdud 152 millimeetrist 508 millimeetrini. Labade vahelised kaugused ulatusid 1.55 kordsest laba diameetrist kuni 4.5 kordse laba diameetrini. Enamik kommertskasutuses olevatest vaiadest jäävadki nende parameetrite sisse. [25]

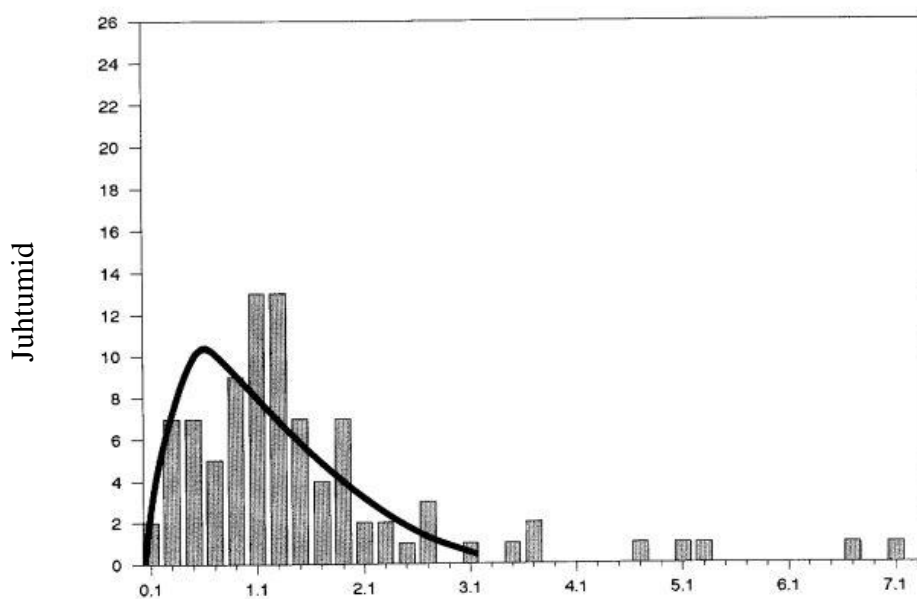
Tabel 1.1. Arvutatud ja tegeliku kandevõime suhete võrdlus $Q_{\text{tegelik}}/Q_{\text{arvutatud}}$ tõmbele arvestades kolme meetodit, põhinedes 91 tõmbekatsele. [25]

Meetod	Miimum	Maksimum	Keskmine	Standardhälve	Mediaan
Silindri nihke	0,07	7,29	1,50	1,18	1,15
Üksiku laba	0,03	7,04	1,56	1,28	1,26
Väändeseos	0,30	4,67	1,49	0,88	1,30



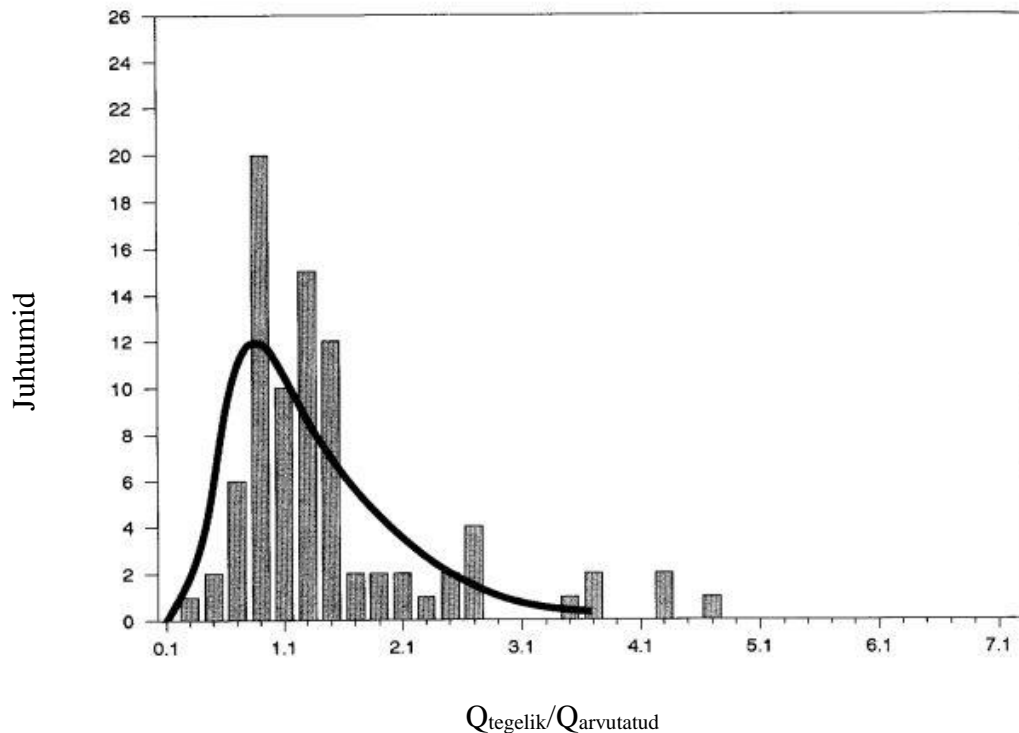
$Q_{\text{tegelik}}/Q_{\text{arvutatud}}$

Joonis 1.11. Tulpdiagramm tegeliku ja arvutatua kandevõime suhtest silindri nihke meetodil. [25]



$Q_{\text{tegelik}}/Q_{\text{arvutatud}}$

Joonis 1.12. Tulpdiagramm tegeliku ja arvutatud kandevõime suhtest üksiku laba meetodil. [25]



Joonis 1.13. Tulpdiagramm tegeliku ja arvutatud kandevõime suhtest väändeseose meetodil. [25]

Tabeli 1.1 selle põhjal tehtud graafikute Joonis 1.11- 1.13 põhjal on järeldatud et kõigi kolme meetodi keskvaartused olid üsna sarnased. Tulemuste vahemik ja standardhälve aga olid märkimisväärselt madalamad väändeseose meetodi puhul kui ülejäänud kahel, mis on pluss väändeseose kasuks. Parema ühtsuse tulemustes võib olla põhjustatud mitme muutuva teguri ära jäämisest. Need tegurid ei suuda alati arvestada pinnase ebakõladega ning teoreetilised numbrid ei ühti alati ühele tegelikkusega. Väändeseosel on aga suur miinus, mida pole ülejäänud meetoditel – nimelt ei saa seda kasutada enne kui vai on juba pinnases. Seega sobib see vaia kandevõime kontrolliks, mitte aga selle projekteerimiseks. [25]

2. Laboratoorsete katsete materjalid ja metoodika

2.1. Katsetel kasutatud pinnas

Laboratoorsete katsete sooritamisel kasutati peenliiva, mille puistetihedus kuivas olekus 1,5-1,6 t/m³, mölli sisaldus > 4%. Lisaks on varem määratud sõelkatsete meetodiga pinnase osakeste suurus. Rohkem kui 50% osakestest kuulusid vahemikku 0,063-4mm. [38]

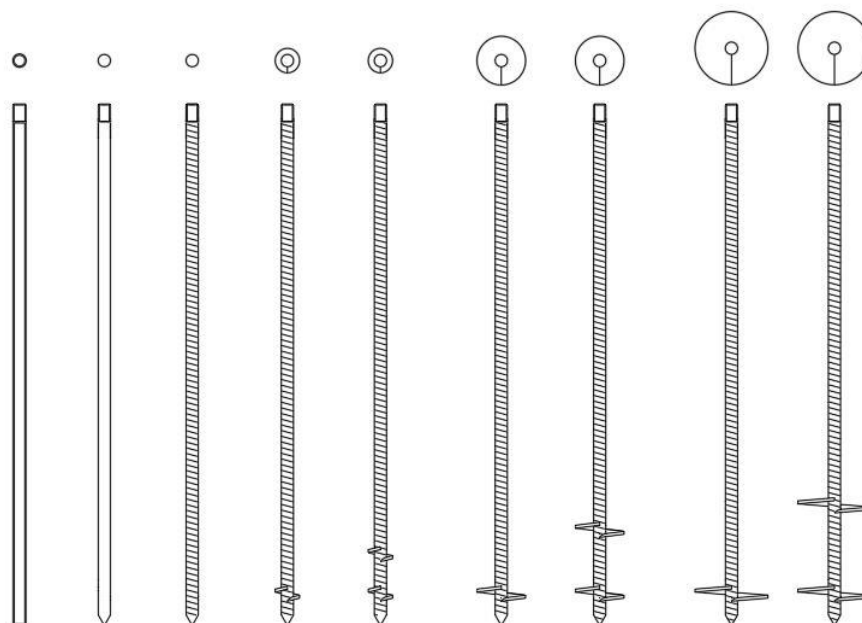
Katselabori liivpinnase tihedusomadusi on varem uuritud Proctorteimi kui ka Terzaghi teimi abil. StandardProctorteim näitas keskmiseks maksimaalseks tiheduseks $\rho_{dmax} = 1,59 \text{ g/cm}^3$ ja Terzaghi puhul $\rho_{dmax} = 1,64 \text{ g/cm}^3$. Arvestame edaspidi Proctorteimi tulemusega 1,59 g/cm³. Poorsustegur seega on tihedaimas olekus $e_{min}=0,62$ ja kohevaimas olekus $e_{max}=0,92$. Nihketeimi katsete põhjal saadi pinnase sisehõõrdenurgaks $\phi = 31$ kraadi ja nidususeks $c = 3 \text{ kPa}$. [39]

Tõmbekatsete teostamisel oli käigus kaks erinevat tihendatud pinnast. Esimesel seerial kasutati pinnase tihendamiseks jalaga tampimist. Teisel seerial kasutati abivahendina 62 kg pinnasetampijat. Pinnasetampijat kasutati ka pinnase ettevalmistamisel survekatseteks. Mõlemal variandil tihendati pinnast sügavustel -0,7 m; -0,4m; -0,1m pinnase nulljoonest. Iga kihi tihendamiseks kulus umbes 1,5-2 minutit. Pinnase keskmise tiheduse määramiseks võeti 5 proovi kummalgi tihendamise variandil ning leiti rõngaste kaalud ja mahud. Esimese seeria puhul saavutati proovi keskmiseks proovi massiks ilma anumata 0,85g, mis andis tiheduseks 1,13 g/cm³. Teisel ja kolmandal seerial saavutati pinnaseproov massiga 110g, mis andis tiheduseks 1,47g/cm³. Pinnase tihedusastmeks kujunes seega kergel tihendamisel 0,71, seda nimetame edaspidi kohevaks pinnaseks. Pinnase tihedusastmeks teisel tõmbekatseseerial ning survekatsetel leiti 0,92, seda nimetatakse edaspidi tihedaks pinnaseks.

2.2. Katsekehad

Katsete läbi viimiseks said projekteeritud ning valmistatud 9 erinevat vaia (Joonis 2.1, 2.2). Kõikide vaiade kogupikkus oli 1070mm, millest pinnasesse jääv pikkus 1000mm. Vaiade materjaliks oli $\varnothing 25$ mm läbimõõduga klassikaline sarrus, erandiks üks sile toru diameetriga 26,7 mm ning sile armatuur läbimõõduga $\varnothing 25$ mm. Edaspidi nimetame ribilise tüvepinnaga vaiu, mis olid tehtud klassikalisest sarrusest lihtsalt vaiadeks. Koostatud katsekehad olid järgnevad:

1. Sile toruvai labadeta
2. Sile vai labadeta
3. Vai labadeta
4. Vai ühe labaga $\varnothing 50$ mm (laba tõusunurk $13,9^\circ$)
5. Vai kahe labaga $\varnothing 50$ mm (laba tõusunurk $13,9^\circ$)
6. Vai ühe labaga $\varnothing 100$ mm (laba tõusunurk $7,1^\circ$)
7. Vai kahe labaga $\varnothing 100$ mm (laba tõusunurk $7,1^\circ$)
8. Vai ühe labaga $\varnothing 150$ mm (laba tõusunurk $4,8^\circ$)
9. Vai kahe labaga $\varnothing 150$ mm (laba tõusunurk $4,8^\circ$)



Joonis 2.1. Tehniline joonis katsetamisele kuuluvatest vaiadest.

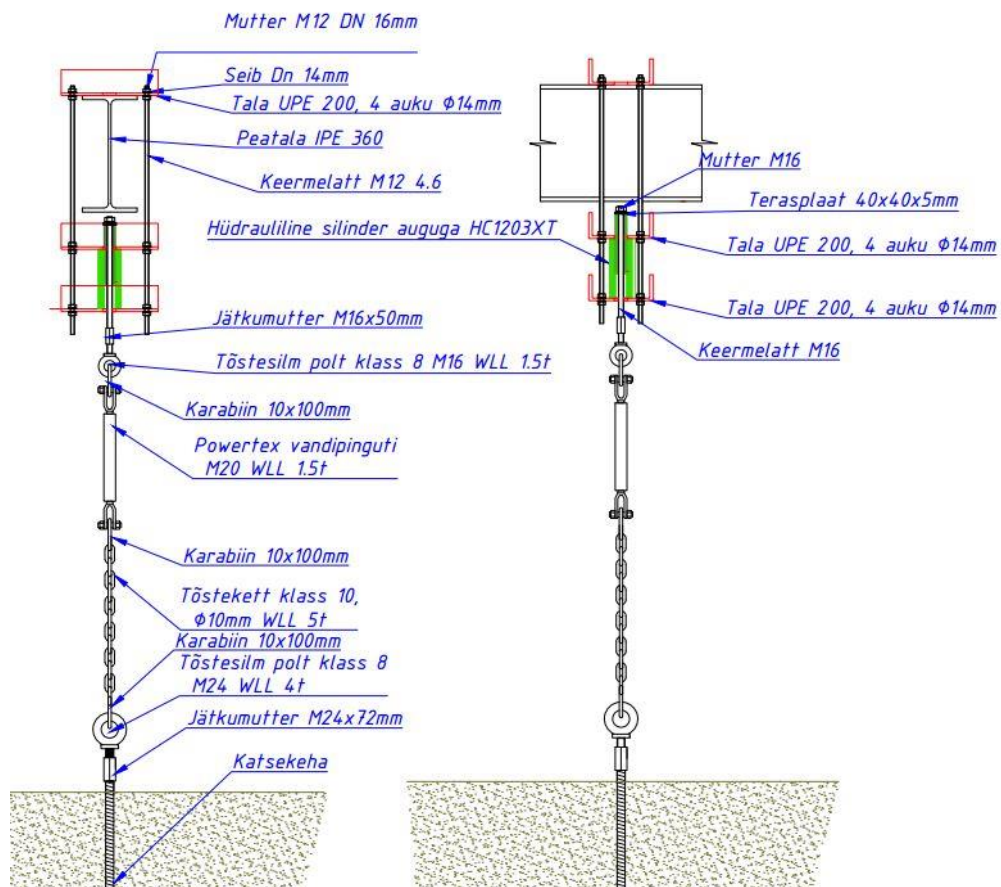


Joonis 2.2. Projekti järgi valmistatud vaiad, mis kuulusid katsetamisele.

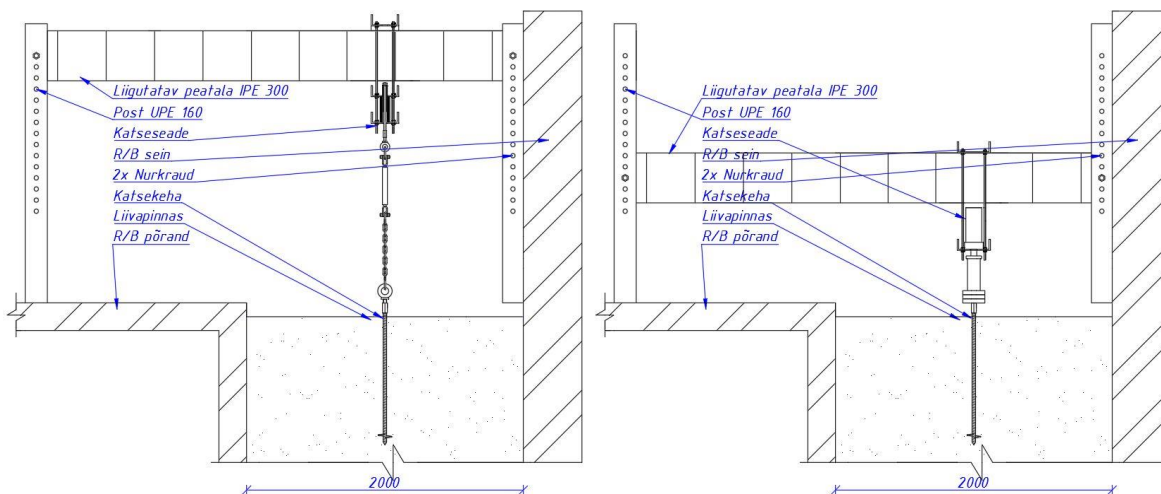
Vaialabad valmistati 6mm terasplaadist ehk labast, mis olid keeratud ümber vaia pulga. Vaiade pinnasesse jääv ots teritati koonusekujuliseks, et süvistamine hõlpsamaks muuta. Vaiade tõmmatav/surutav ots keermestati keermega M24, kuhu kinnitada jätkumutter katse sooritamiseks.

2.3. Tõmbekatse katseseade

Katsete sooritamiseks konstrueeriti katseseade (Joonis 2.3), mille saaks katseobjekte vajaliku jõuga mõjutada. Katseseadme projekteerimisel lähtuti labori võimalustest. Kasutada oli pinnasega täidetud kast mõõtmetega 2x3,5m (Joonis 2.4) ning selle kohal I tala, mille külge sai paigaldada ülejäänud vajalikud lülid ja detailid. Lõputöö probleemist tingituna moodustasid enamus katseid teste tõmbejõule.



Joonis 2.3. Tehniline joonis katseseadmest.



Joonis 2.4. Liivapinnasega täidetud kast koos katseseadmega. Vasakul seade tõmbejõu, paremal survekandevõime rakendamiseks.

Katsete eesmärgist ning seadme konstruktsioonist lähtudes tekkis katseseadme kokkupanekul vajadus avaga survesilindri järele. Tõmbekatsete teostamiseks sai jõuallikaks valitud BVA survesilinder HC1203XT, maksimaalse kandevõimega 107kN (Joonis 2.5).



Joonis 2.5. Katsetamiseks kasutatav õõnes survesilinder BVA HC1203XT.



Joonis 2.6. Valmis tõmbekatse seade koos maapinna liikumist mõõtvate anduritega.

Silinder oli paigutatud UPE 200 terasprofiilide vahele ning tõmbas katsekeha läbi silindri jooksva keermelati, mis oli ühendatud läbi vahedetailide vaia külge kinnitatud ketile. Keermelatti hoidis silindri liikuva kolvi peal terasplaat kaks M16 mutrit, mille all paiknes terasplaat mõõtmatega 40x40x4mm ning seib M16. Keermelati ning vaia külge ühendatava keti vahel asetsetes vandipinguti, millega tagati enne katse algust pinges ühendus, et survestamisel hakkaks mõjuma koormus koheselt vaiale (Joonis 2.6).

2.4.Survekatse katseseade

Survekatsete tegemiseks tuli ümber sättida kogu katseseade. Põhiline vahe oli survesilindris, mis asendati seekord Lukas LZM 25/200 katseseadmega, maksimaalse kandevõimega 250 kN ja silindri käiguga 200mm. Vaia surumiseks lasti peatala madalamaks ning silinder kinnitati sama peatala ning UPE 200 tala vahele. Silindri kolb suunati vaia suunas ning lisati vajalikud vahelülid. Survestamise tulemusena hakkas kolb liikuma vertikaalses sihis alla, tekitades sellega survejõu katsekehale (Joonis 2.4).

2.5.Katseplaan

2.5.1. Vaiade maasse süvistamise plaan

Vaiade süvistamiseks töötati välja plaan, et protsess oleks koguaeg sama, tagades sarnased tingimused vaiadele ja säästa aega.

A. Labadega vaia süvistamine:

1. Esimesel katseseerial pinnase viimine tihedusastmeni 0,71
Teisel katseseerial pinnase viimine tihedusastmeni 0,92
2. Vaia maasse süvistamine 900mm ulatuses. labadega vaiade puhul kasutades jõudu ning väänet. Kasutada eritellimusel valmistatud 1m pikkust võtit (Joonis 2.7).
3. Vaia väändemomendi testimine keerates vaia mõõteriistaga Gedore Dremometer.
4. Vaia lõpuni süvistamine, pinnasest peab välja jääma 70mm vaia ülemisest otsast.
5. Esimesel katseseerial vaia jätmine pinnasesse 24 tunniks enne katse alustamist.
Teisel katseseerial kohene katse algus.



Joonis 2.7. Vaia pinnasesse süvistamine kasutades selleks 1m läbimõõduga eritellimusel võtit.

B. Sileda varda süvistamine:

1. Esimesel katseseerial pinnase viimine tihedusastmeni 0,71
Teisel katseseerial pinnase viimine tihedusastmeni 0,92
2. Vaia maasse süvistamine 800mm ulatuses kasutades löögienergiat.
3. Vaia vaste mõõtmine. Lastakse 3 korda 60 cm pealt 10 kg suurust raskust kukkuda vaiale, 5-10 korda. Mõõdeti vajum.

2.5.2. Vaiade katse ettevalmistus

1. Esimese asjana teostada katseseadme ülevaatus. Üle oli vaja kontrollida kinnitusvahendid, mõõteseadme ning materjalide seisukord.
2. Katsekeha ühendamise katseseadme külge tehti joonise 2.3 järgi. Lisaks tuli katseseadme külge paigaldada terasplaat 100x40x4mm, mille külge kinnitati vertikaalne siirdeandur.
3. Vaia ümber tuli paigaldada andurid maapinna tõusu mõõtmiseks. Andurid paiknesid ümber vaia kahel küljel kaugustel 10, 20, 30, 40, 50 cm arvestusega vaia tsentrist.
4. Enne silindri survestamist kett vandipingutiga pingule tõmmata.

2.5.3. Vaia tõmbekatse

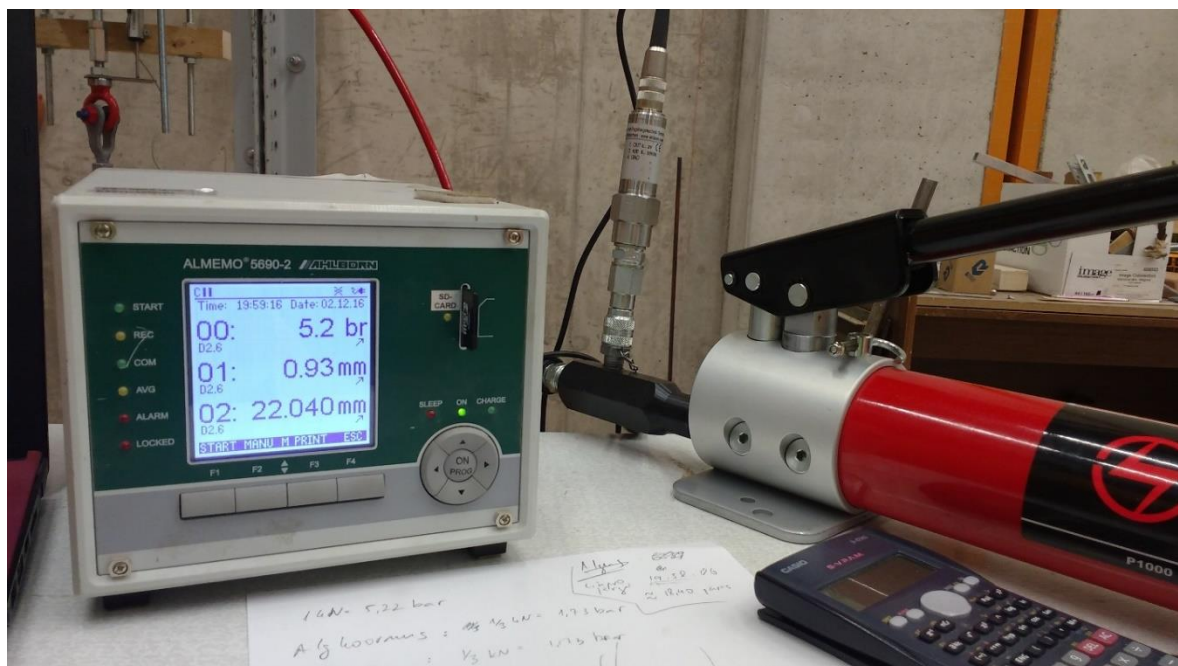
1. Esimene koormusaste. Tõmbesüsteemi rakendatakse esimene koormus sõltuvalt vaiast. Võetakse vaia vaia siirde lugemist 1, 3, 7 ja 10 minuti möödumisel. Juhul kui 3. minuti näit pole 5ndaks minutiks suurenenud rohkem kui 0,05mm, suurendatakse koheselt koormust. Fikseeritakse maapinna tõusu lugemid.
2. Teine koormusaste. Tõmbesüsteemis tõstetakse koormust. Võetakse vaia vaia siirde lugemist 1, 3, 7 ja 10 minuti möödumisel. Vajadusel pumbatakse süsteemi õli juurde, et rõhk oleks koormusastmel sama. . Juhul kui 3. minuti näit pole 5ndaks minutiks suurenenud rohkem kui 0,05mm, suurendatakse koheselt koormust. Fikseeritakse maapinna tõusu lugemid.
3. Järgnevad koormusastmed on analoogsed eelnevale. Koormusastmeid tuleb ideaalis sihtida kümne astme ligi.
4. Loetakse katse lõppenuks kui siire on olnud 4 cm, või kui vai ei suuda enam koormust vastu võtta
5. Eemaldatakse vai maast.
6. Pinnase ettevalmistus järgmiseks katseks.

2.5.4. Vaia survekatse

1. Esimene koormusaste. Survesüsteemi rakendatakse algkoormus sõltuvalt vaiast. Võetakse vaia vaia siirde lugemist 1, 3, ja 5. minuti möödumisel. Fikseeritakse maapinna tõusu lugemid.
2. Teine koormusaste. Survesüsteemis tõstetakse koormust sõltuvalt vaiast. Võetakse vaia vaia siirde lugemist 1, 3, 5 minuti möödumisel. Vajadusel pumbatakse süsteemi õli juurde, et rõhk oleks koormusastmel sama.
3. Järgnevad koormusastmed on analoogsed eelnevale. Koormusastmeid tuleb ideaalis saada kümme.
4. Loetakse katse lõppenuks kui siire on olnud 2 cm.
5. Eemaldatakse vai maast.
6. Pinnase ettevalmistamine järgmiseks katseks.

2.6. Katsetulemuste mõõtmine

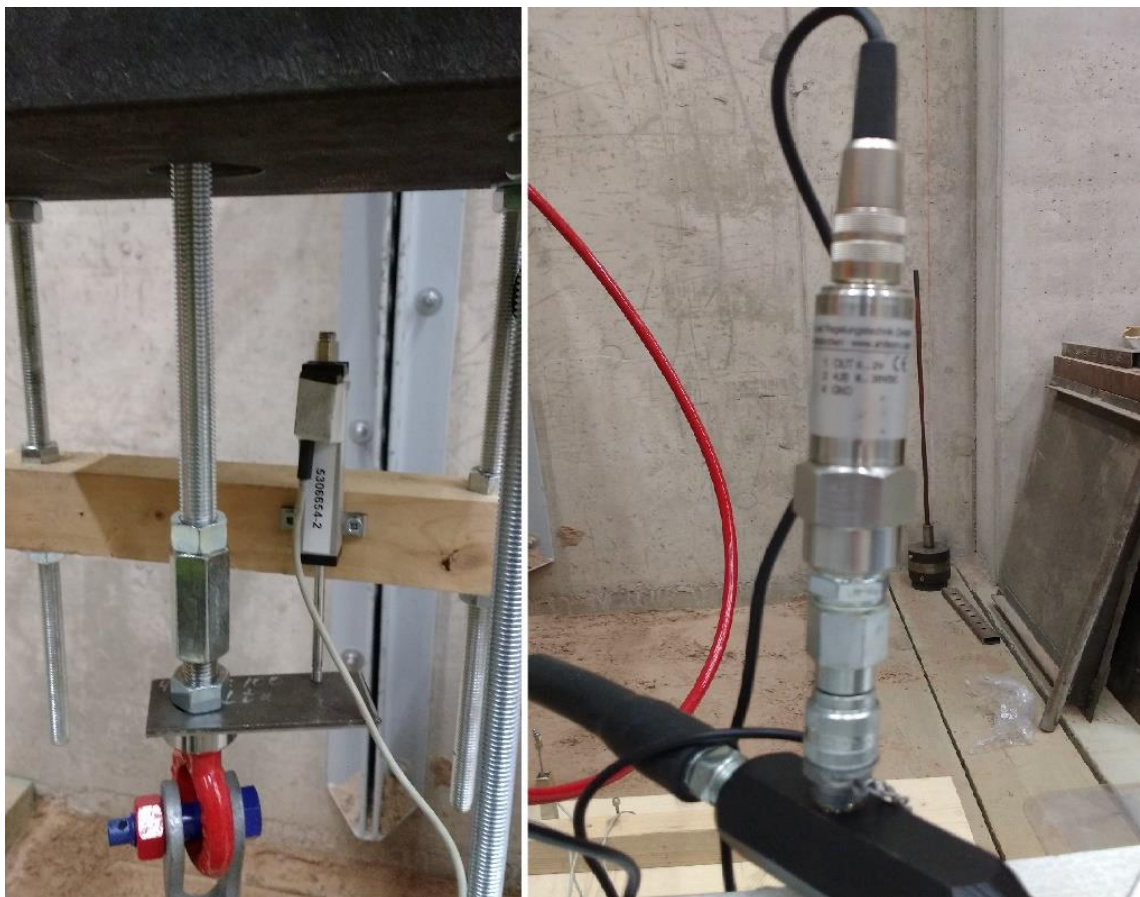
Katsetulemuste fikseerimiseks kasutati Ahlborn Almemo 5690-2 mõõteseadet, mis kogus informatsiooni katse tulemuste kohta (Joonis 2.8). Kokku oli mõõteseadmega ühendatud 12 Ahlborni andurit. Maapinna tõusu uurimiseks edastasid andmeid kümme andurit, kaugusega -50, -40, -30, -20, -10, 10, 20, 30, 40, 50 cm vaia tsentrist (Joonis 2.9). Vaia vertikaalset siiret mõõtis üks andur, mis oli kinnitatud katseseadme külge ning viimane andur oli mõeldud silindris asuva rõhu mõõtmiseks (Joonis 2.10).



Joonis 2.8. Ahlborn Almemo 5090-2 mõõteseadet (vasakul).

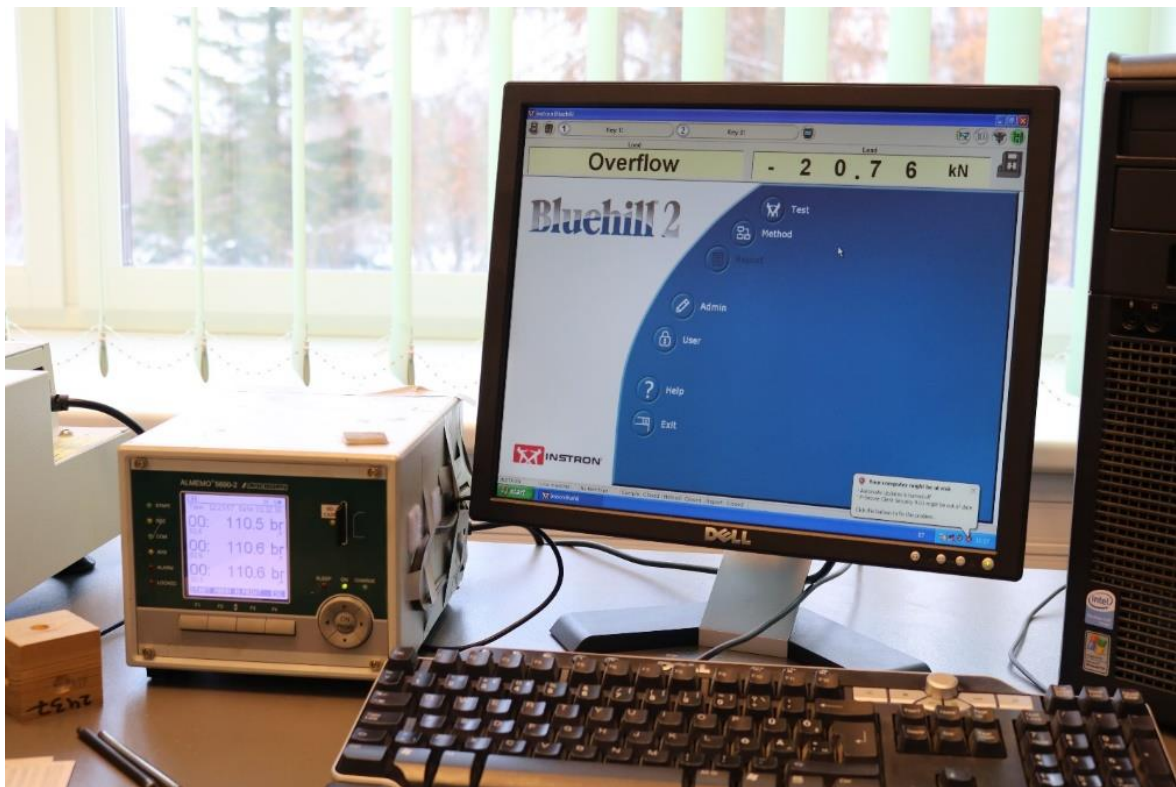


Joonis 2.9. Maapinna tõusu mõõtvad Ahlborni andurid 10 cm sammuga vaia tsentrist.



Joonis 2.10. Vasakul prussi küljes Ahlborni andur, mis mõõdab vaia vertikaalset siiret, paremal Ahlborni rõhuandur.

Kuna silindris olev rõhunäit oli baarides, tuli see teisendada tegelikuks vardale mõjuvaks koormuseks. Kalibreerimiseks kasutati Eesti Maaülikooli metsandusinstituudis olevat survepressi ning Bluehill 2 tarkvara, mis andis silindri surveastamisel tekkinud rõhu koormusvaste kilonjuutonites (Joonis 2.11). Kokku sooritati neli testi 19-37 tulemusega testi kohta, kus iga 5 bari rõhu korral võeti vaste kilonjuutonites. Kõik tulemused kanti tabelisse ja saadi keskmiseks rõhuvastavuseks $1\text{kN}=5,22\text{ bar}$.



Joonis 2.11. Silindri kalibreerimine. Vasakul asuvas Almemo mõõteseades silindris asuv rõhk baarides, paremal monitoris Bluehill 2 programmis koormuse vastavus kilonjuutonites.

Testi tulemused salvestati tekstifailina mälukaardile, kust hiljem kanti need tabelisse. Andmete alusel tehti katsetulemuste punkti all graafikud maapinna tõusu ning koormuse ja vaia siirde vahel. Katsetulemuste põhjal koostatakse iga katse jaoks katseprotokoll. Katseprotokollid iga katse jaoks on välja toodud lisas lisas 2.

3. Katsetulemused

3.1. Tõmbekatse tulemused kergel tihendamisel

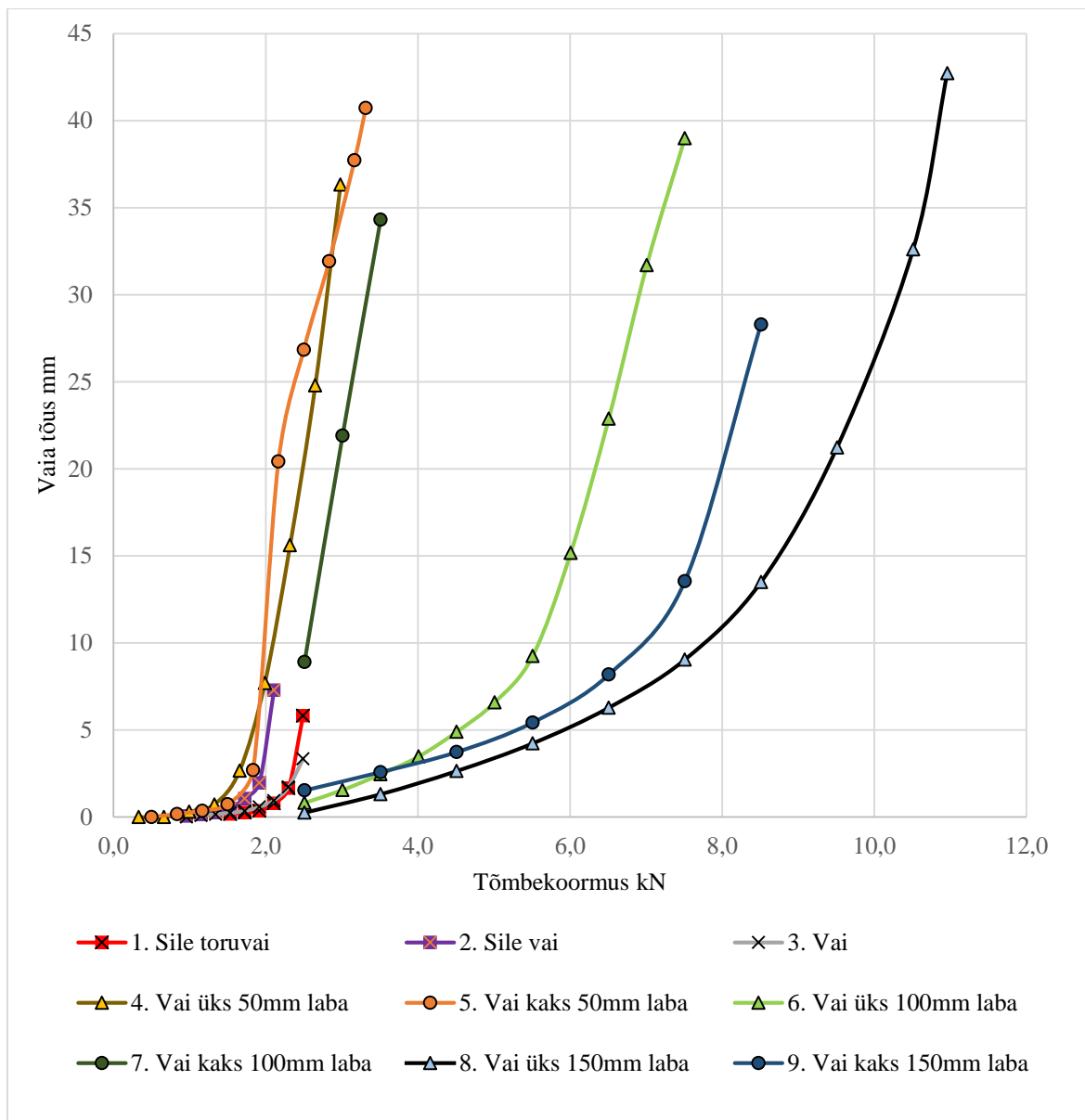
Kohevas pinnases saadud vaiade maksimaalne tõmbekandevõime on näidatud tabelis 3.1. Siire maksimumkoormusel näitab vaia tõusu viimasel koormusel mida vai suudab vastu võtta. Vaiavõtmega ei suudetud ühtegi näitu saada kuna näidud olid mõõtepiirkonnast väljas. Pinnasetihedus oli madal, mistõttu olid ka kandevõimed kesised.

Tabel 3.1. Katseobjektide maksimaalsed tõmbekandevõimed ja roomepiirid kohevas pinnases.

Katseobjekt	max koormus kN	Pinnas tihedusteguriga 0,71 (kohev pinnas)		
		koormus roomepiiril kN	siire max koormusel mm	väändevõtme näit Nm
1. Sile toruvai	2,49	2,2	5,83	-
2. Sile vai	2,11	1,75	7,29	-
3. Vai	2,68	1,75	7,91	-
4. Vai labaga 50mm	3,00	1,75	36,32	-
5. Vai kahe labaga 50mm	3,00	1,80	37,73	-
6. Vai labaga 100mm	7,50	5,50	38,99	-
7. Vai kahe labaga 100mm	3,50	2,5	34,32	-
8. Vai ühe labaga 150mm	10,50	1,80	32,6	-
9. Vai kahe labaga 150mm	8,50	6,50	28,3	-

Enne katsete algust tehtud esitatud eeldused et kahe labaga vaiad on kandevõimelt viletsamad kui nende ühe labaga versioonid, pidas paika. 50mm ühe labaga vaia kandevõime sarnanes vaiaga, millel oli labasid topelt. Sellest saab järeldada, et peab paika tingimus et

vaia labade samm peab olema suurem kui kolmekordne laba diameeter. Ootuspärane on ka tulemus, et ilma labata vaiad saavutavad roomepiiri väga kiiresti ja järsku, mille ületades kandevõime enam suurene. Selle põhjustab külghõõrde ületamine, mille tõttu kandevõime ammendub.



Joonis 3.1. Tõmbekatse tulemused kohevas pinnases.

Graafikult saab lugeda et vaia käitumine on erinev labadega vaiade ning tavaliste varraste vahel. Ilma labadeta vaiad saavad oma kandevõime külghõõrdest, ning kui see ületada, annavad nad kiiresti järgi ning kandevõime lakkab järsult. Seevastu labadega vaiade puhul töötab rohkem vaia laba, mis üritab liigutada pinnast selle kohal. Graafik illustreerib ka hästi

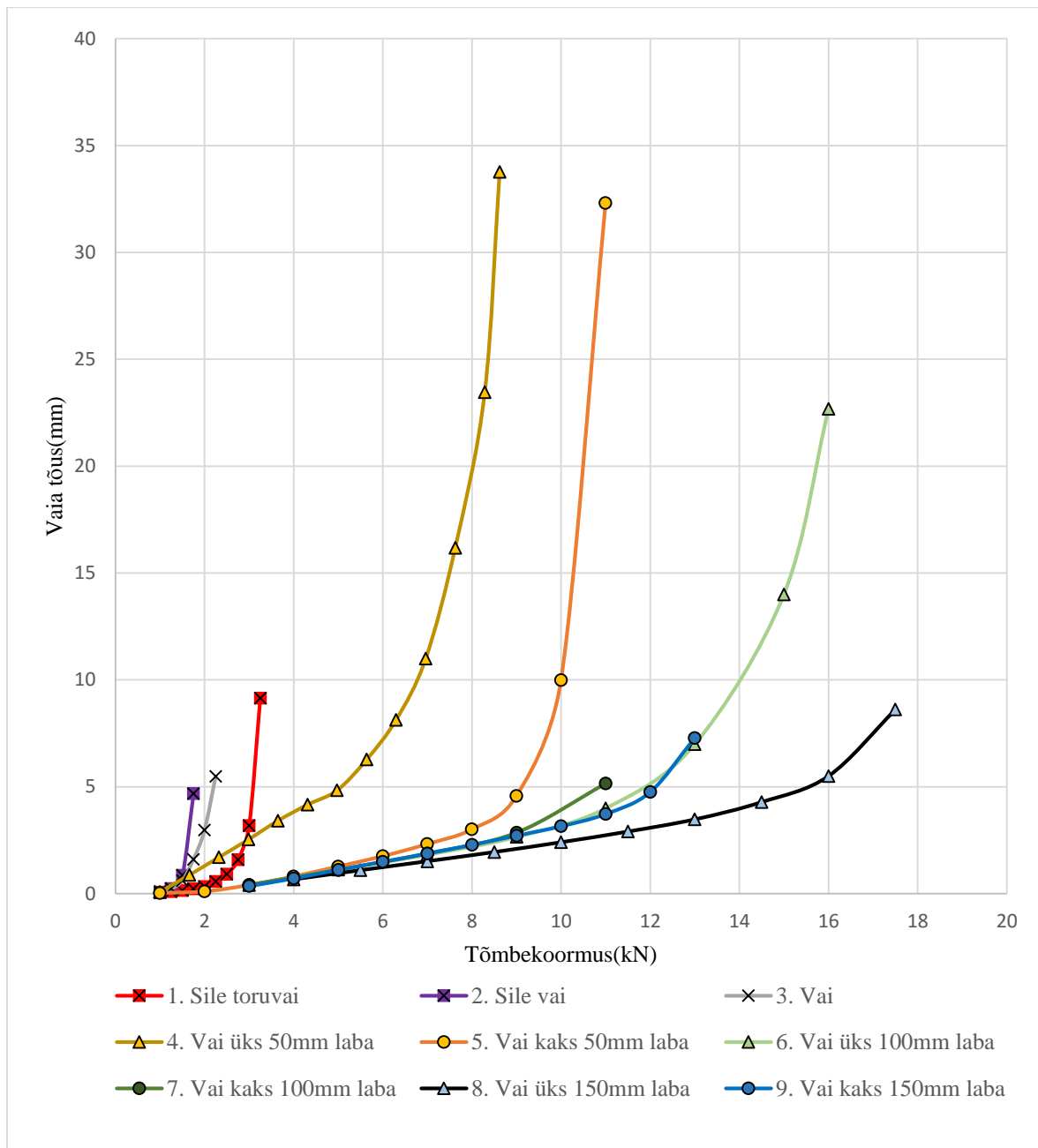
seda, et mida laiemaks vaia diameeter läheb, seda ühtlasem on koormuskõver, mida väiksem on laba, seda kiiremini ning järsemalt ületatakse roomepiir. See on loogiline, kuna kontrast laba ning vaia läbimõõtude vahel läheb aina suuremaks.

3.2. Tõmbekatse tulemused tihedas pinnases

Tihedas pinnases saadud vaiade maksimaalne tõmbekandevõime on näidatud tabelis 3.2. Pinnase tiheduse suurenedes suurenes ka kandevõime märgatavalt. Tänu tihedamale pinnasele õnnestus mõne vaiaga fikseerida ka väändevõtme näit.

Tabel 3.2. Katseobjektide maksimaalsed tõmbekandevõimed tihedas pinnases.

Katseobjekt	max koormus kN	Pinnas tihendusteguriga 0,92 (tihe pinnas)		
		koormus roomepiiril kN	siire max koormusel mm	väändevõtme näit Nm
1. Sile toruvai	3	2,50	3,18	-
2. Sile vai	1,75	1,40	4,68	-
3. Vai	2,25	1,50	5,48	-
4. Vai labaga 50mm	8,62	6,50	33,76	-
5. Vai kahe labaga 50mm	11	9	32,31	-
6. Vai labaga 100mm	16	11	22,67	260
7. Vai kahe labaga 100mm	11	9	5,15	230
8. Vai ühe labaga 150mm	17,5	15	8,61	480
9. Vai kahe labaga 150mm	13	11	7,28	420



Joonis 3.2. Tõmbekatsede tulemused tihedas pinnases.

Labadeta vaiad kaotavad sarnaselt kohevale pinnale kiiresti oma kandevõime ka tihedas pinnases. Roomeläve ületamisel ei suuda vaiad enam raskust kanda, kuna kaob külghõõre, mis tagab ainsana kandevõime. Erinevus koheva pinnasega on see, et külghõõre on tiheduse tõttu suurenenud, mistõttu kannatab ta rohkem koormust, enne kui järgi annab. Labadega vaiade puhul on graafikult näha, et 150mm labaga vaial pole teravat kontrasti roomepiiril. Tulemused on märgatavalt paranenud kõigil katsekehadel. Roomepiiride muut kahe pinnase vahel on toodud tabelis 3.3.

Tabel 3.3. Roomepiiride erinevused kohevas ja tihedas pinnases.

Katseobjekt	roomepiir kohevas pinnases kN	roomepiir tihedas pinnases kN	roomepiiri muut %
1. Sile toruvai	2,2	2,50	+13,6
2. Sile vai	1,75	1,40	-17,6
3. Vai	1,75	1,50	-14,3
4. Vai labaga 50mm	1,75	6,50	+295
5. Vai kahe labaga 50mm	1,80	9	+500
6. Vai labaga 100mm	5,50	11	+200
7. Vai kahe labaga 100mm	2,5	9	+360
8. Vai ühe labaga 150mm	1,80	15	+833
9. Vai kahe labaga 150mm	6,50	11	+169

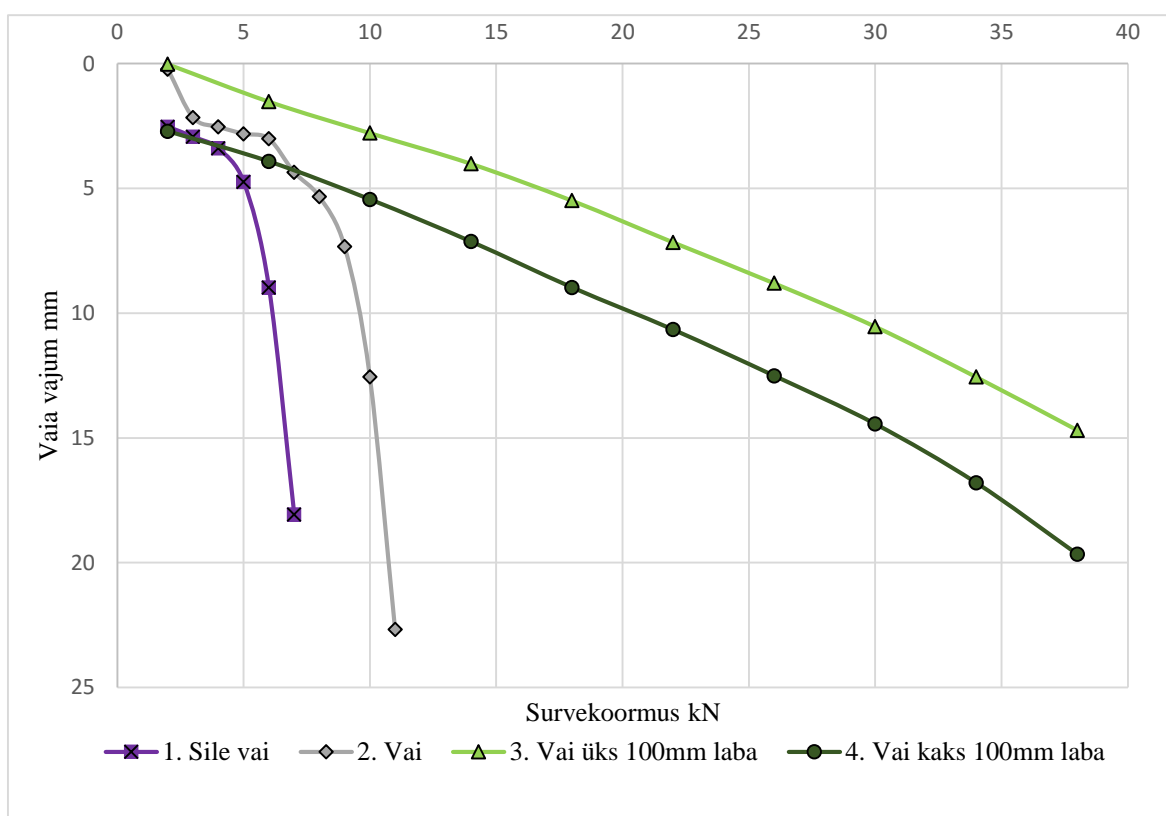
Pinnase tihendamine tähendab roomepiiri märkimisväärtset tõusu. Roomepiir ei muutunud oluliselt katsekehadel millel puudusid labad. Külghõõre kaob nendel labadel järsult igasuguses pinnases, mistõttu ei saa väikeste vaiadega head kontrasti.

3.3.Survekatsetulemused tihedas pinnases

Tihedas pinnases saadud vaiade maksimaalne survekandevõime on näidatud tabelis 3.4. Lõputöös ettenähtud katseplaan nägi ette sileda ning klassikalise sarruse võrdlust, samuti võrdlust vaiadega, millel üks ning kaks 100mm läbimõõduga laba. Labadega vaiad olid taaskord piisava kandevõimega et fikseerida väändevõtme näit enne katsete alustamist.

Tabel 3.4. Katseobjektide maksimaalsed survekandevõimed tihedas pinnases.

Katseobjekt	Pinnas tihendusfaktoriga 0,92(tihe pinnas)			
	max koormus kN	koormus roomepiiril kN	siire max koormusel mm	väändevõtme näit Nm
1. Sile vai	7	5	18,07	-
2. Vai	10	7,90	12,55	-
3. Vai labaga 100mm	38	38	14,69	250
4. Vai kahe labaga 100mm	38	38	19,66	250



Joonis 3.3. Survekatse tulemused tihedas pinnases.

Kolmanda katseseeria kriteeriumiks oli surve avaldamine objektile, kuni on toimunud nihe 20mm ulatuses. Labadega vaiad said üsna võrdsed koormustulemused, veidi erinevate

nihkenäitusega. Kaks laba ei suutnud kanda rohkem kui üks, suuresti samadel põhjustel – labade töötsoonid kattusid, lisaks kobestas alumine laba süvistamisel ülemise töötsooni. Ootuspärane oli sileda ning klassikalise sarruse tulemus. Roomepiiri ületamisel kiirenes katsekeha suutmatust suuremat koormust vastu võtta. Siiski saab tõdeda, et reljeefse pinnaga vai pidas pisut paremini vastu, kuna pind mis töötab külghõõrdele on reljeefse tõttu suurem.

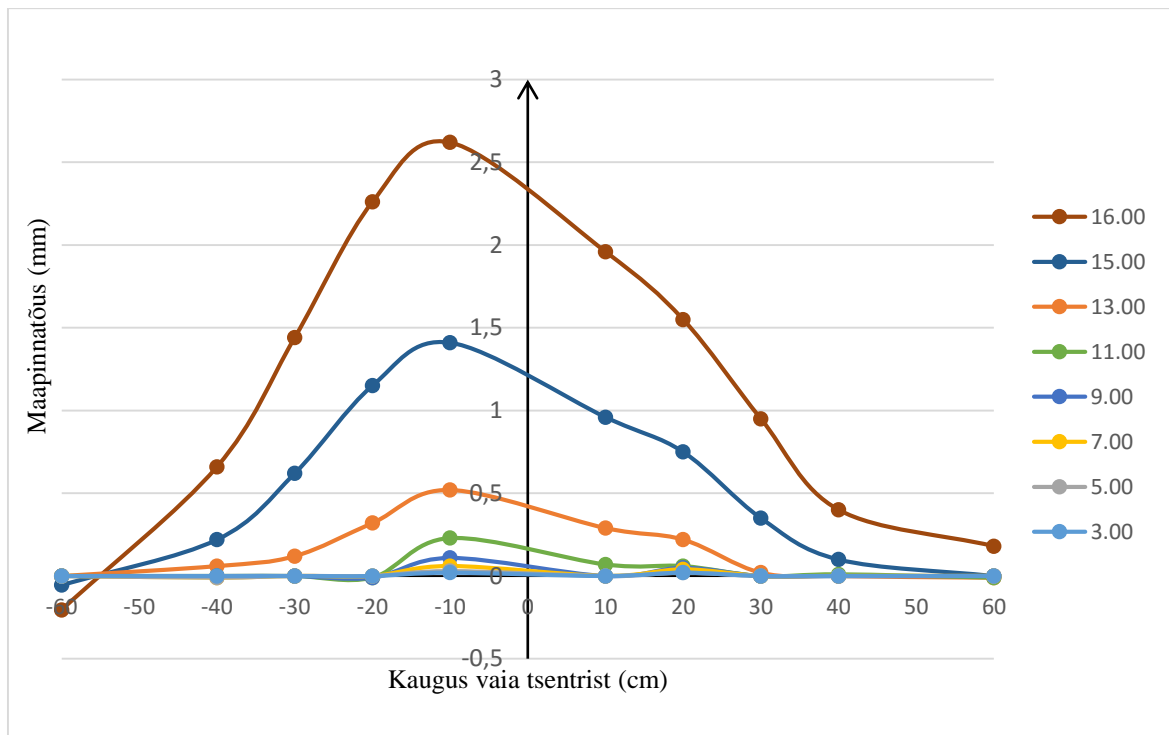
3.4..Maapinna kaasatöötamise sõltuvus vaia labast

Katsete läbiviimise üks eesmärkidest oli jälgida pinnase liikumist vaia tõmbamise ning surumise vältel. Saadud andmest saab järeldada kui palju maapind kaasa töötab teatud katsekehadega, samuti kuidas töötab külghõõre ning kuidas mõjutab see kandevõimet.

Pinnasetõusu uurimiseks fikseeriti maapinna nihked vastavalt punktile 2.6 – katsetulemuste mõõtmise. Pinnase nihkumist ei olnud otstarbekas kaasata labadeta vaiade puhul, kuna pinnase liikumine oli minimaalne, seega ei pakkunud tulemus adekvaatset pilti liivas toimuvatest muutustest. Iga katsekeha kohta moodustati andmekogum (Tabel 3.5), milles kirjas pinnase muut igal koormusastmel. Andmekogumi põhjal koostati graafik (Joonis 3.4), mis illustreerib konkreetse vaia katsetamise vältel toimunud maapinna muutu.

Tabel 3.5. Andmekogum maapinna tõusu iseloomustamiseks erinevatel koormusastmetel. Katseobjektiks kruvivai ühe 100mm läbimõõdus labaga.

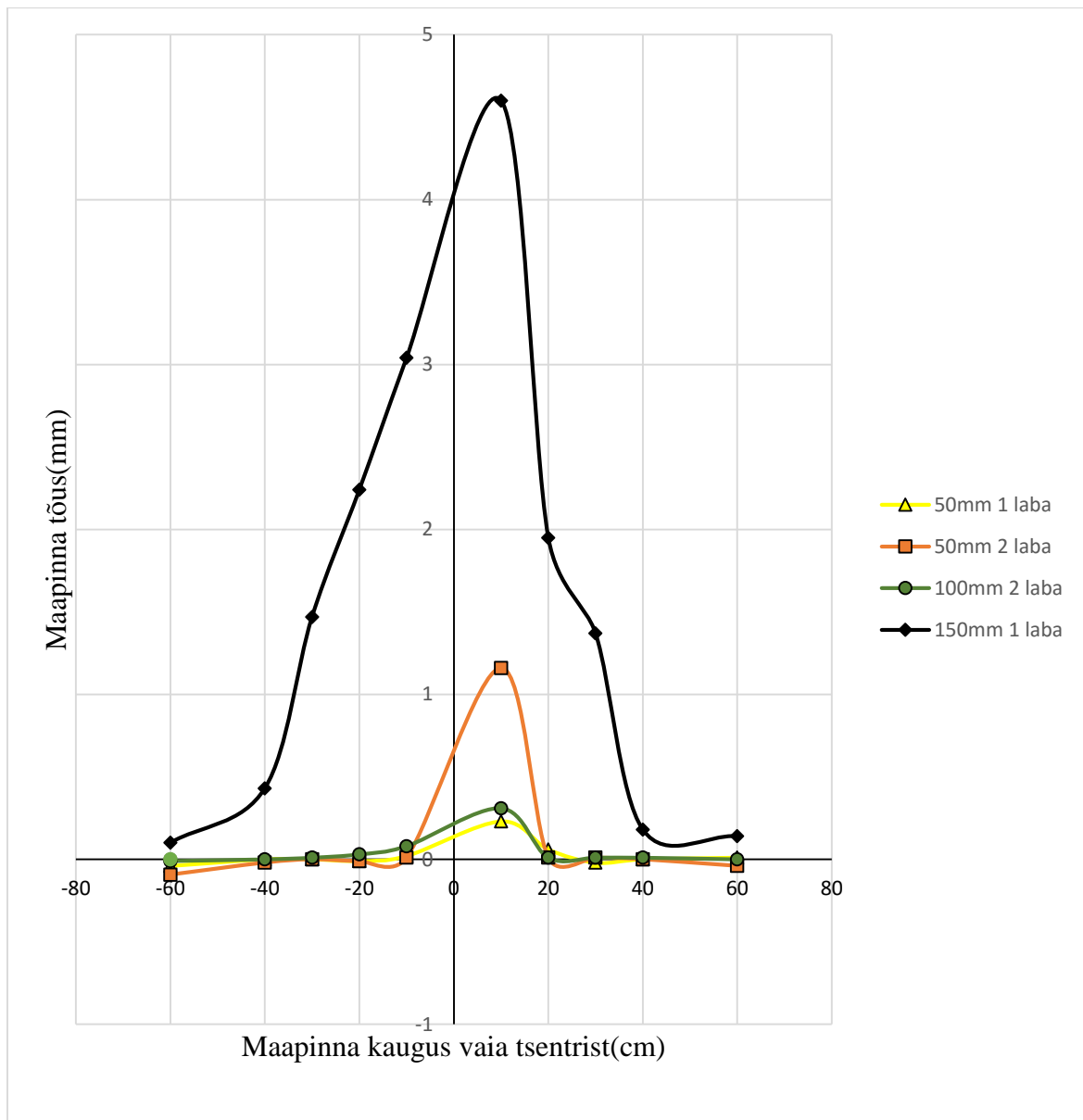
Koormusastme number	Koormus kN	Maapinna kaugus vaia tsentrist cm									
		-50	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40	50
		Maapinna tõus mm									
1	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
2	5.00	0.00	-	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
3	7.00	0.00	-	0.00	0.00	0.06	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
4	9.00	0.00	0.00	0.00	-	0.11	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
5	11.00	0.00	0.00	0.00	-	0.23	0.07	0.06	0.00	0.01	-0.01
6	13.00	0.00	0.06	0.12	0.32	0.52	0.29	0.22	0.02	0.00	-0.01
7	15.00	-0.05	0.22	0.62	1.15	1.41	0.96	0.75	0.35	0.10	0.00
8	16.00	-0.21	0.66	1.44	2.26	2.62	1.96	1.55	0.95	0.40	0.18



Joonis 3.4. Maapinna tõusu illustreeriv graafik, mis baseerub tabelis 3.5 sisalduvale andmekogumile. Katseobjektiks kruvivai ühe 100mm läbimõõdus labaga tihedas pinnases.

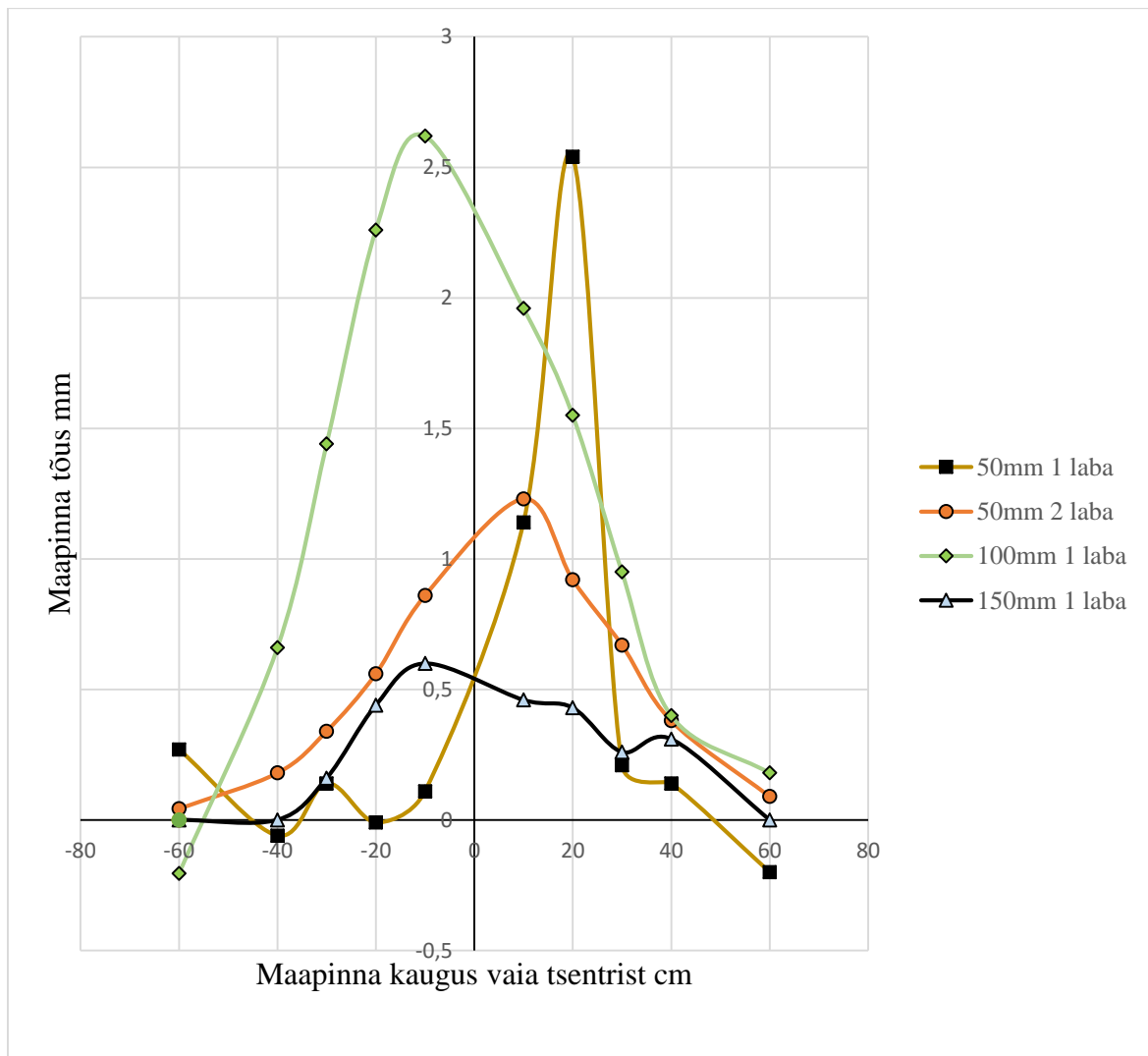
Graafikut analüüsid võib järeldada, et maapinna tõus ja koormuse suurenemine ei ole lineaarses seoses. Väiksemate koormustega ei ole jõud piisav et liigutada maapinda olulisel määral, maapinna tõus kasvab hüppeliselt vaia maksimumkandevõimele lähenedes. Siiski ei ole pinnase tõus märkimisväärne, 16 kN juures on see vaid 2,5mm vaia tsentris. Kui arvestada roomeläve ületuspiiril olevat koormust 12kN, on tõusuks vähem kui pool millimeetrit. Joonisel toodud vai haarab pinnast roomepiiril kõigest 20-30cm raadiuses, lõppkoormusel laieneb see 50 cm-le.

Pinnasetõusu erinevuste ja mõjude välja toomiseks on katsekehade tulemusi võrreldud ning kõrvutatud. Lisaks labadeta vaiadele puuduvad võrdlusest kohevas pinnas tõmbekandevõime määramisel tekkinud tehniliste probleemide tõttu andmed katsekehade nr. 6 (kruvivai 100mm labaga) ning nr. 9 (kruvivai 2x150mm labaga). Tihedas pinnases on samade probleemide tõttu puudu andmed katsekehade nr. 7 (kruvivai 2x100mm labaga) ning nr. 9 (kruvivai 2x150mm labaga).



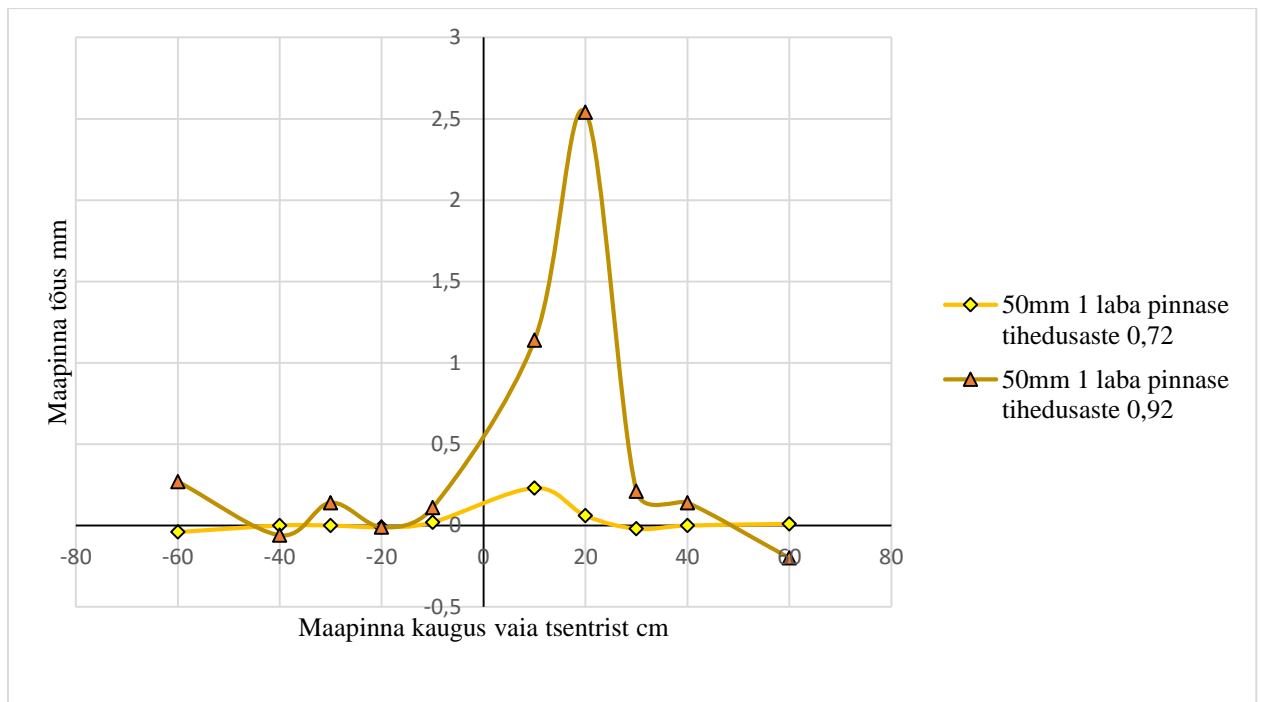
Joonis 3.5. Maapinna tõusud tõmbetestides maksimaalsel koormusel kohevas pinnases.

Pinnase liikumine kohevas pinnases on erinevatel katsekehtadel üsna sarnase iseloomuga, erandiks on suur kontrast ühe 150mm labaga vaiaga, mis suutis pinnast vaia tüve ümber tõsta lausa 4,6mm. Tasub ka ära märkida, et pinnasetõus on kergelt ekstsentriline, maksimum pinnase nihe pole päris vaia tüve ümber, vaid pisut eemal. Selle võib põhjustada vaialaba tõusunurk – mida suurem see on, seda rohkem tõmmatakse vaia viltu.

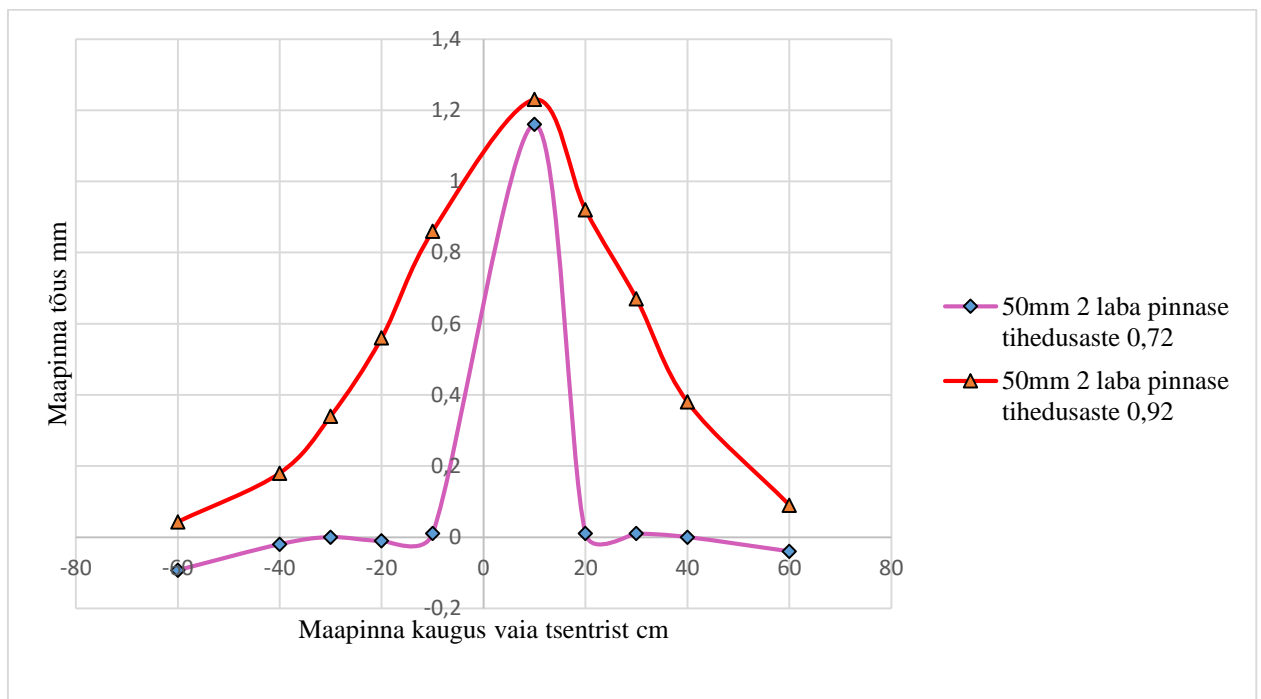


Joonis 3.6. Maapinna tõusud tõmbetestides maksimaalsel koormusel tihedas pinnases

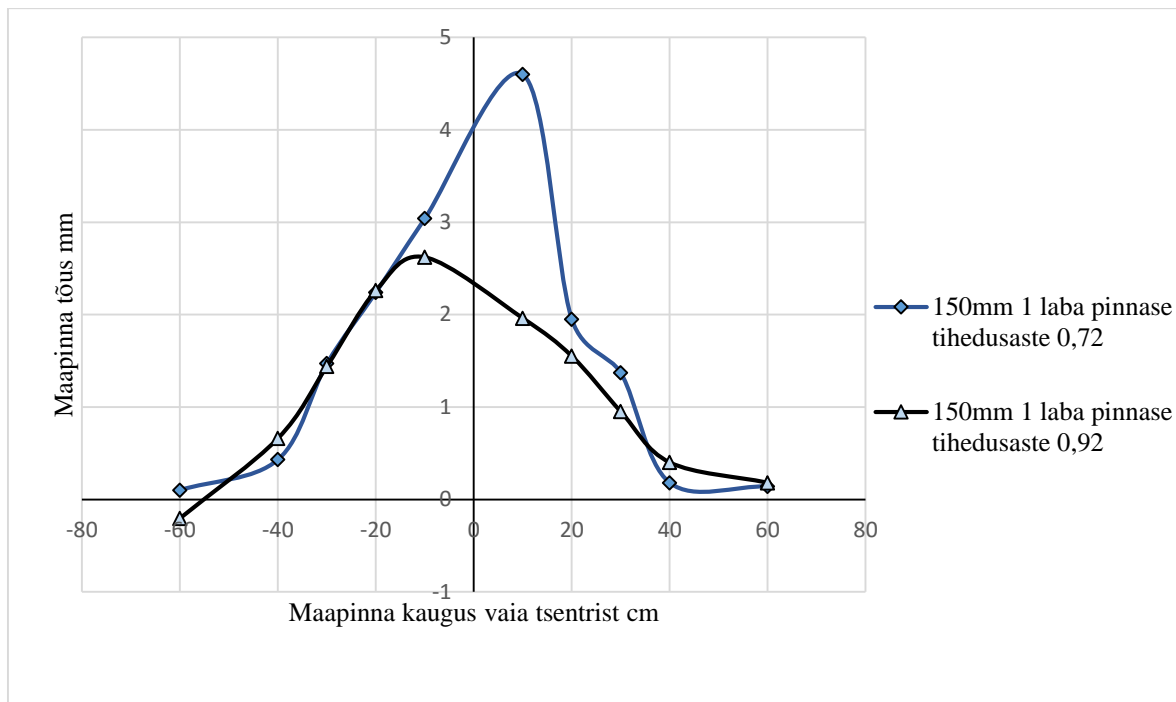
Teooria, et vaialabade diameetri vähenedes teravneb pinnasekõver peab paika. Tulemus illustreerib hästi seda, et kitsam laba paneb tööle pinnase väiksemas mahu. Kuigi kruvivaiadel 1x50mm labaga ning 1x100mm labaga on pinnasetõus maksimum koormusel vaia tsentris sarnane – väärtusega ~2,6mm, joonistub välja, et 100mm laba on pinnast kaasa haaranud oluliselt laiemalt.



Joonis 3.7. 50mm 1 labaga vaia poolt põhjustatud pinnaseniikumiste võrdlus I ja II seerias



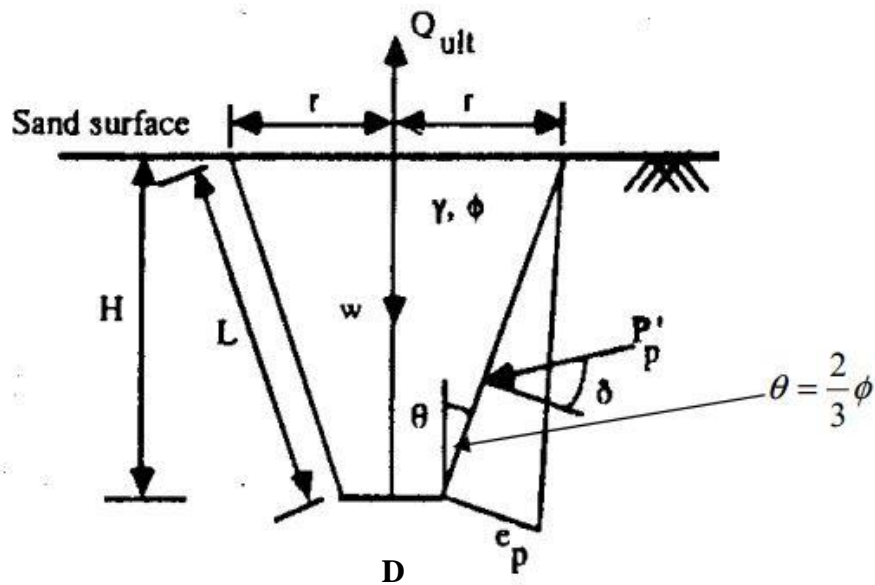
Joonis 3.8. 50mm 2 labaga vaia poolt põhjustatud pinnaseniikumiste võrdlus I ja II seerias



Joonis 3.9. 150mm 1 labaga vaia poolt põhjustatud pinnaseniikumiste võrdlus I ja II seerias

Joonistel 3.7, 3.8 ja 3.9 on esitatud ühe katsekeha poolt tekitatud maapinna liikumise võrdlus kahe erineva tihedusastmega pinnases. Graafikutelt saab järeldada, et tihedusastme kasvades töötab pinnas suuremas mahus kaasa, kohevamas pinnases haarab pinnast pigem vaia lähedalt. Eriti hästi joonistub see välja esimesel kahel joonisel. Suurem pinnase kaasamine tekitab laiema pinnasekoonuse, kasvab mõjutatava pinnase maht ning kasvatab hõõret. Seega on lühikeste kruvivaiadega vundamendil eriti oluline, et pinnas oleks nii lähedal tihedusastmeni 1 kui võimalik.

Maapinna tõusu graafikud loovad võimaluse leida tekkiva pinnasekoonuse nurk θ (Joonis 3.10). Õige nurgaga saaks arvutada pinnase kaalu mida tõmbel liigutatakse, samuti koonuse küljepindala, mööda mida tekib hõõrdejõud. Ghaly on oma uurimustöodes soovitanud nurga väärtuseks $2/3$ pinnase sisehõõrdenurgast. Mitsch ja Clemence on sama nurga leidmiseks teinud järelduse et pinnase sisehõõrdenurk tuleb jagada kahega. Magistritöö katsete pinnase sisehõõrdenurgaks oli 31 kraadi, mis tähendab et Ghaly teooria järgi peaks olema nurk umbes 20,3 kraadi; Mitch ja Clemence teooria kohaselt 15,5 kraadi.



Joonis 3.10. Laba kohal tekkiva töötav pinnasekoonus. [17]

Tabel 3.6. Katsetulemustele tuginedes arvatatud pinnasekoonuse nurk θ .

Katseobjekt	Koonuse nurk θ tõmbetestides kohevas pinnases	Koonuse nurk tõmbetestides θ tihedas pinnases
4. Vai labaga 50mm	7^0	10^0
5. Vai kahe labaga 50mm	7^0	15^0
6. Vai labaga 100mm	-	19^0
7. Vai kahe labaga 100mm	9^0	-
8. Vai ühe labaga 150mm	9^0	28^0
9. Vai kahe labaga 150mm	-	-

Tulemused näitavad et tihedas pinnases leitud koonuse nurgad sarnanevad väga nii Ghaly kui ka Mitsch- Clemence poolt pakutud väärtustega. Kohevas pinnases jäi nurk umbes pool sellest, mida Mitsch- Clemence teooria soovitas. Vaiu süvistatakse üldiselt korralikult tihendatud pinnasesse, mistõttu võib järeldada et saavutades tihedusastmeks rohkem kui 0,92, lähevad tulemused veelgi täpsemaks. Seega saab kasutada üldistatud meetodit pinnasekoonuse nurga leidmiseks, kui pinnas on tihendatud võimalikult tihedaks.

4. Järeldused, arutlus, tulemuste võrdlus

4.1. Tõmbekandevõime võrdlus teoreetiliste meetoditega

Selle peatüki eesmärk on kandevõime tulemusi võrrelda teoreetiliste meetoditega, mida on diskusseeritud kirjanduse ülevaates, samuti leida mõni arvutusvalem, mis sobiks antud töös käsitletud vaiadega. Arvutatud kandevõimed kõrvutatakse katselisel teel saadud tulemustega labori keskkonnas peatükis 2 – Laboratoorsete katsete materjalid ja metoodika, toodud parameetritel.

Arutlus keskendub pigem ühe labaga vaiade kandevõime analüüsile. Silindri nihke meetod ja üksiku laba meetod kahe labaga katsekehade kohta omab nõuet et vaialabade vahe oleks vähemalt kolm laba diameetrit. Eesmärgiga arvutusmodelit rohkem testida ning jälgida kui lähedale oma katsekehadega tulemuseni jõuame, on sellegipoolest arvutused sooritatud. Vaialabade miinimum sammu tagamise põhjuseks on vaialaba töötsoonide kattumine, ülemine vai on alumisele liiga lähedal, mistõttu ei haara labad pinnast efektiivselt. Lisaks tuleb tähele panna, et ülemise laba töötsoon oluliselt kohevamaks tehtud süvistamise tõttu.

Ühe labaga vaiad on arvutatud Meyerhof-Adamsi, Vesici, Saeedy, Ghaly-Hanna arvutusmodelite ning Chance üksiku laba meetodi järgi. Arvutusest tuli välja jätta Balla valem, kuna selle arvutamiseks peab olema vundamendi sügavuse ja laba suhe maksimaalselt 4. Sõltuvalt sarnasest piirangust on arvutustest välja jäänud ka mõned teised arvutused 50mm ja 100mm labadega. Kandevõime tulemused on kantud tabelisse 4.1.

Tabel 4.1. Tõmbekandevõime võrdlus ühe labaga vaiadel katsetulemuste ning arvutusmeetodite vahel tihedas pinnases.

Katse- keha	Katse- tulemus roome- piiril kN	Max kande- võime kN	Chance kN	Ballal kN	Meyer- hof, Adams kN	Vesic kN	Saeedy kN	Ghaly, Hanna kN
Vai 1 labaga 50mm	6	8.62	0.98	-	3.35	-	-	
Vai 1 labaga 100mm	12	16	1.23	-	4.56	-	2.05	-
Vai 1 labaga 150mm	16	17.5	2.77	-	5.77	4.16	4.62	5.1

Arvutustulemused näitavad, et mitte ühegi arvutusmodeliga ei suudeta tagada tulemus mis ühtiks katseliste tulemustega. Arvutused alahindavad kandevõimeid kordades. Kõige lähemale jõuti Meyerhof-Adams valemiga, mille tulemus 150mm labaga oli 5,77 kN. Võrreldes seda lõpliku katsetulemusega, saadi täpsusprotsendiks vaid 32,97%. Peaaegu kõik tulemused jäävad umbes 1/3 tegeliku kandevõime juurde, kohati vähemgi. Halvim sobivus tuleb Chance üksiku laba meetodist, mille tulemused on umbes poole väiksemad kui teistel meetoditel.

Saame järeldada et arvutusmodelid ei sobi uurimustöö raames koostatud vaiade projekteerimiseks. Varem välja töötatud meetodites on kasutatud alati pikemaid ja/või massiivsemaid vaiu.

Tabel 4.2. Tõmbekandevõime võrdlus kahe labaga vaiadel katsetulemuste ning arvutusmeetodite vahel tihedas pinnases.

Katsekeha	Katsetulemus roomepiiril kN	Katsetulemus lõplik kN	Silindri nihke meetod kN	Üksiku laba meetod kN
2 laba 50mm	8.5	11	2.90	1.27
2 laba 100mm	9	11	3.70	2.30
2 laba 150mm	12	13	4.57	5.02

Kahe labaga vaiad olid projekteeritud ebapiisava labade vahega. Seega ei saa nende kandevõimet valemitega korrektselt arvutada. Oletades, et labade vahe ei ole määrav, sooritati arvutused ja kanti tulemused tabelisse 4.2. Kandevõimeks taas tunduvalt väiksem number kui see, mida vai tegelikult välja kannab. Eeldusel et oleks tagatud nõuetekohane labade samm, näitaksid katsetulemused suuremaid numbraid. Üksiku laba meetodi tulemus enam ei tõuseks, silindri nihke meetodi oma pisut küll, kuna selles valemis on labade vahe sees. Siiski jääks täpsusprotsent tõenäoliselt 30% ümber või alla selle, mis tähendab et varutegur oleks umbes 3.

4.2.Survekandevõime võrdlus teoreetiliste meetoditega

Kirjanduse ülevaates arutatud silindri nihke ja individuaalse laba meetod on mõlemad selle uurimuse raames sobimatud. Kahe labaga katsekehade probleem on ebapiisav labade vahe, mis mõjub hävitavalt kandevõime arvutusele. Lisaks on katsekehad mõõtmatega, mis jäävad alla vaiadele, millele arvutusvalemid põhinevad. Individuaalse laba meetod survele peaks olema sarnane tõmbele, kuid ilmselgelt kannab laba survele oluliselt rohkem, kui süvistamissügavus piirdub ühe meetriga.

Tabel 4.3. Silindri nihke (ing. k. *cylindrical shear*) meetodil saadud survetulemuste võrdlus katseliste tulemustega.

Katsevai	Katseline tulemus kN	Silindri nihke meetod kN	Individuaalse laba meetod kN
1 laba 100mm	38	-	1,23
2 laba 100mm	38	1,43	2,30

Kahe meetodi kandevõimed ja katselised tulemused on esitatud tabelis 4.3. Võib järeldada et meetodid ei sobi lühikestele kruvivaiadele absoluutselt, kuna arvutuslik kandevõime on alla 1/10 tegelikust kandevõimest, eeldusel et on lubatud vajum kuni 20mm.

Kirjanduse ülevaate punktis 1.2 mainitud väljatõmbe teguril F_q on suur roll kandevõime arvutamisel. Teguri saamiseks on sooritanud meetodi looja hulk katseid, saadud tõmbekandevõimed jagatud vastava laba pindala, sügavuse ja tiheduse korrutisega ning koostatud selle põhjal graafikud, mida kasutada edaspidi vaia projekteerimiseks. Eesmärgiga hinnata selle uurimuse katsevaiade tüübi väljatõmbe tegurit, sooritati arvutused ning tulemused kanti tabelisse 4.4.

Arvutus sooritati kirjanduse kokkuvõttes uuritud Vesici teooria järgi, ning see näeb välja järgmine: [20]

$$F_q = \frac{Q_u}{\gamma A_h H}, \quad (1.17)$$

kus A_h on laba pindala m²;

H – vaia pindala m²;

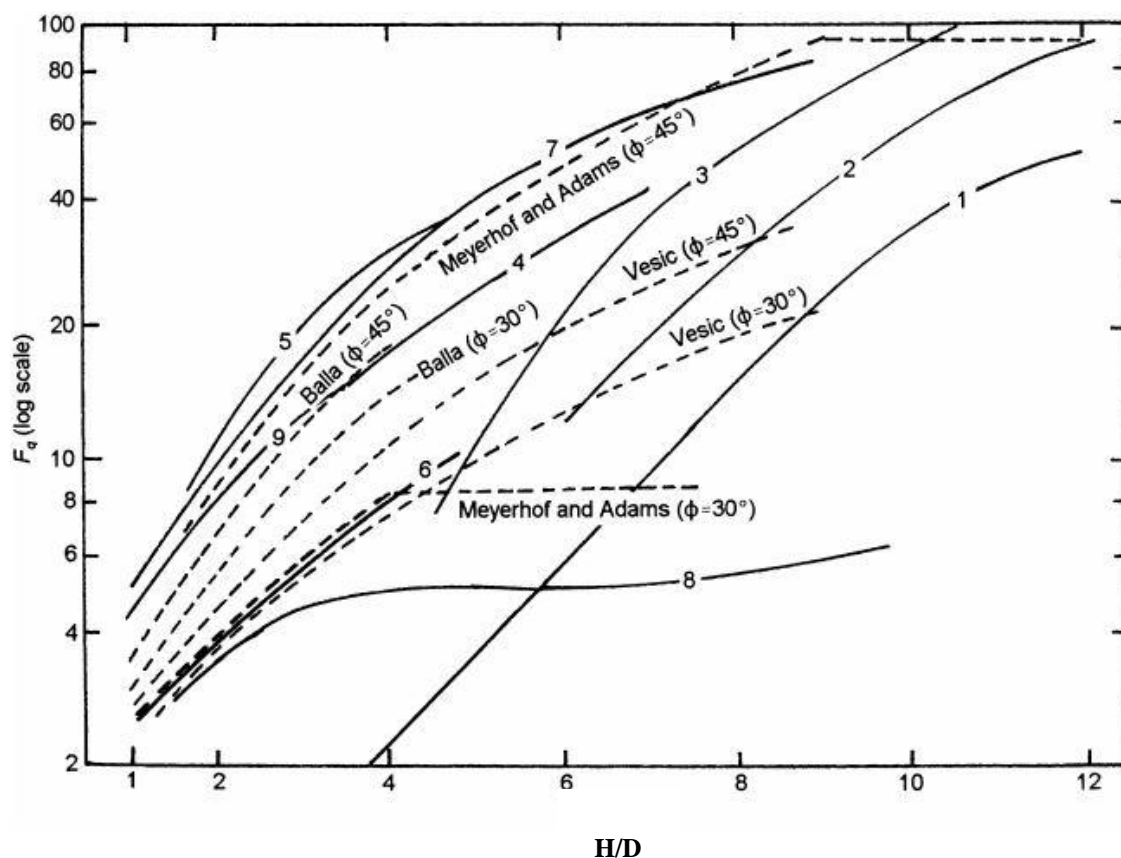
F_q – väljatõmbetegur (ing. k. *breakout factor*);

Q_u – vaia kogukandevõime kN.

Teguri arvutus on sarnane ka paljudel teistel meetoditel.

Tabel 4.4. Ühe labaga katsevaiade väljatõmbe teguri arvutatud väärtused.

Katsevai	Väljatõmbe teguri F_q väärtus
Vai 1x50mm laba	297
Vai 1x100mm laba	139
Vai 1x150mm laba	67
*Konstandid: pinnasetihedus 14,7 kN/m ³ ; sügavus 1m; sisehõõrdenurk 31°	



Joonis 4.1. Kandevõime teguri F_q määramine joonise järgi erinevate arvutusmeetoditel. [12]

Tabelisse 4.4 kantud tulemused saab kõrvutada teiste uurijate saadud väärtustega joonisel 4.1. Jooniselt on puudu Saeedy tulemused, kelle kõrveralt saab nii 100 kui ka 150 mm labaga vaia puhul teguri F_q väärtuseks 10. Näeme et suurema laba suurenedes hakkab arvutatud kandevõime tegur muutuma täpsemaks sellega, mida peaks tabelist saama otsida.

Teoorias saaks arvutada täpset tõmbekandevõimet, kui oleks vaia projekteerimisel teada tegur F_q . Antud uurimustöös on aga katseid liiga vähe et saaks kindlaid järeldusi teha või koostada korrektseid seoseid, mille alusel teha sobilik graafik nagu on tehtud Meyerhof-

Adamsi poolt joonisel 1.4 või koondandmeid sisaldaval joonisel 4.1. Tabeli 4.4 tulemuste järgi saab püstitada hüpoteesi, et need tegurid võiksid olla paar punkti graafikul mis tuleks luua sarnaste kruvivaiade arvutamiseks.

4.3.Labadeta vaiade kandevõime võrdlus teoreetilise meetodiga

Siledade vaiade survekandevõimet saab arvutada Gersevanovi arvutusmudeliga (valem 1.15). Vaiade kalkuleerimiseks oli vajalik sooritada löökkatsed mehaanilise vasaraga vaia süvistamisel. Saadi vajumisvasted, tänu millele saab arvutada kandevõime. Survekandevõimet katsetati kahe katsekehaga – ribilise pinnaga vai ja sile vai. Mõlemad andsid vaia süvistamise lõppfaasis üheks vasteks keskmiselt 7mm. Sama tulemuse sai ka tõmbekatsete sooritamisel, mis on loogiline kuna pinnasetihedus oli sama. Mõlemal katsekehal oli sarnane tüve diameeter ning vajum, seega tuli sooritada üks arvutus.

Tabel 4.5. Labadeta vaiade katseliste tulemuste võrdlus teoreetilise meetodiga.

Katsekeha	Max surve- kandevõime roomepiiril kN	Max surve- kandevõime kN	Gersevanovi meetod survele kN	Tõmbe- kandevõime roomepiiril kN	Max tõmbe- kandevõime kN
Klassikaline sarrus 25mm	7	10	2,67	1,5	2,25
Sile sarrus 25mm	5	7	2,67	1,4	1,75

Kandevõimeks Gersevanovi valemi järgi tuli mõlemal katsekehal 4,01 kN, mida jagades läbi katsetatud vaiade arvust sõltuva parandusteguriga, sai lõplikuks kandevõimeks 2.67 kN (Tabel 4.5). Katsete ning arvutuse resultaadina näeme, et taaskord on kandevõime oluliselt suurem kui arvutatud. Täpsus vaiaga, mille materjal on 25mm klassikaline sarrus on 26,7% ning täpsus sama läbimõõduga sileda sarrusega on 38,1%. Seega taaskord alahindab valem oluliselt antud töös kasutatavaid katsekehasid, pakkudes varuteguriks 2,5-3.

Huvitav on fakt, et Gersevanovi valem, mis on mõeldud survekandevõime arvutamiseks, jõuab palju lähemale tõmbekatse tulemustele. Vaadates kareda pinnaga vaia lõplikku tõmbekandevõimet näeme lausa 84% sarnasust. Arvestades jällegi roomepiiri langeb täpsus

umbes 60%-ni. Siinkohal püstitada hüpoteesi, et viies pinnasetiheduse 0.92lt 0.99ni, saaks vaia, mis on tehtud reljeefse pinnaga sarrusest, tõmbekandevõimet üsna täpselt analüüsida Gersevanovi survekandevõime valemiga. Tõenäoliselt on selles uuringus läbiviidud katsekehad taas liiga väikeste mõõtmetega, mistõttu ei anna survekandevõime valem korrektset tulemust.

4.4.Väändeseos

Väändeseose testimiseks vaatame andmeid teisel ja kolmandal katseseerial. Esimesel katseseerial oli pinnas liiga kohev ning tulemused halvemad, seega ei õnnestunud väändevõtme näitu saada. Lisaks ei saanud väändevõtme näitu teises seerias ka 50mm labadega vaiaga ning vaiadega, millel labad puudusid. Kolmandas ehk surveseerias katsetati ainult 100mm ühe ja kahe labaga vaiasid.

Väändeseose teel kandevõime arvutamiseks on kasutatud kahte teguri K_t väärtust. Üks neist on 33, mis on soovituslik väärtus Hoyt'i ja Clemence' poolt alla 89mm tüve läbimõõduga vaiade arvutamiseks. Teine, 42, on leitud kasutades punktis 1.2.3 välja toodud valemit. Tulemused on kõrvutatud tegelike kandevõimetega ning leitud valemi sobivus, arvutades välja tulemuse täpsus.

Tabel 4.6. Vaiavõtme näidud, arvutatud kandevõimed ning tegelikud kandevõimed tõmbekatsetel liivapinnases tihedusastmega 0,92

Katse-keha	Vaia-võtme näit Nm	Kandevõime kui $K_T=33$ N	Kandevõime kui $K_T=42$ N	Tegelik kandvõime N	Varutegur, kui $K_T=33$	Varutegur, kui $K_T=42$
1 laba 100mm	260	8580	10920	16000	1,86	1,47
2 laba 100mm	230	7590	9660	11000	1,45	1,14
1 laba 150mm	480	15840	20160	17500	1,10	0,86
2 laba 150mm	420	13860	17640	13000	0,93	0,74

Võrdluse tulemusena näeme et 150mm ühe ja kahe labaga vaiade puhul sobis K_T väärtus 33 väga hästi. Ühe ja kahe labaga kandevõime varutegur oli vastavalt 1,10 ja 0,96. 100mm ühe ja kahe labaga vaiade puhul ei osutunud seos täpseks ning tegelik kandevõime saadi oluliselt parem kui arvutuslik. Kruvivaia ühe 100mm labaga täpsusprotsendi parandamiseks võib alandada tegeliku kandevõime roomepiirini, milleks on 12 kN, sellisel juhul tõuseb täpsus. Samas 1,5 on suhteliselt standartne varutegur geotehnilistes arvutustes kuna pinnas võib olla üsna muutlik

Suurem K_T väärtus (42) parandab 100mm labadega vaiadel täpsust rohkem kui 15% ning kui arvestame taas ühe 100mm labaga vaia kandevõimeks roomepiiril 12kN, saame selle täpsuseks lausa 91%. Seekord ei sobi tegur 150mm labadega vaia jaoks, mille puhul on tegelik kandevõime väiksem kui arvutatud kandevõime.

Kõikide vaiade tüve läbimõõt on sama – 25mm. Teoreetiliselt peaks olema kandevõime täpsusprotsent olema kõigil vaiadel sarnane. Siit saame järeldada, et antud katsetel kasutatud vaiade puhul ei saa väita et K_T sõltub ainult vaia tüvest. Katsetel kasutatud vaiad on oluliselt väiksemate mõõtmetega kui varem uuritud vaiad, tabeli põhjal saab aga väita et mida

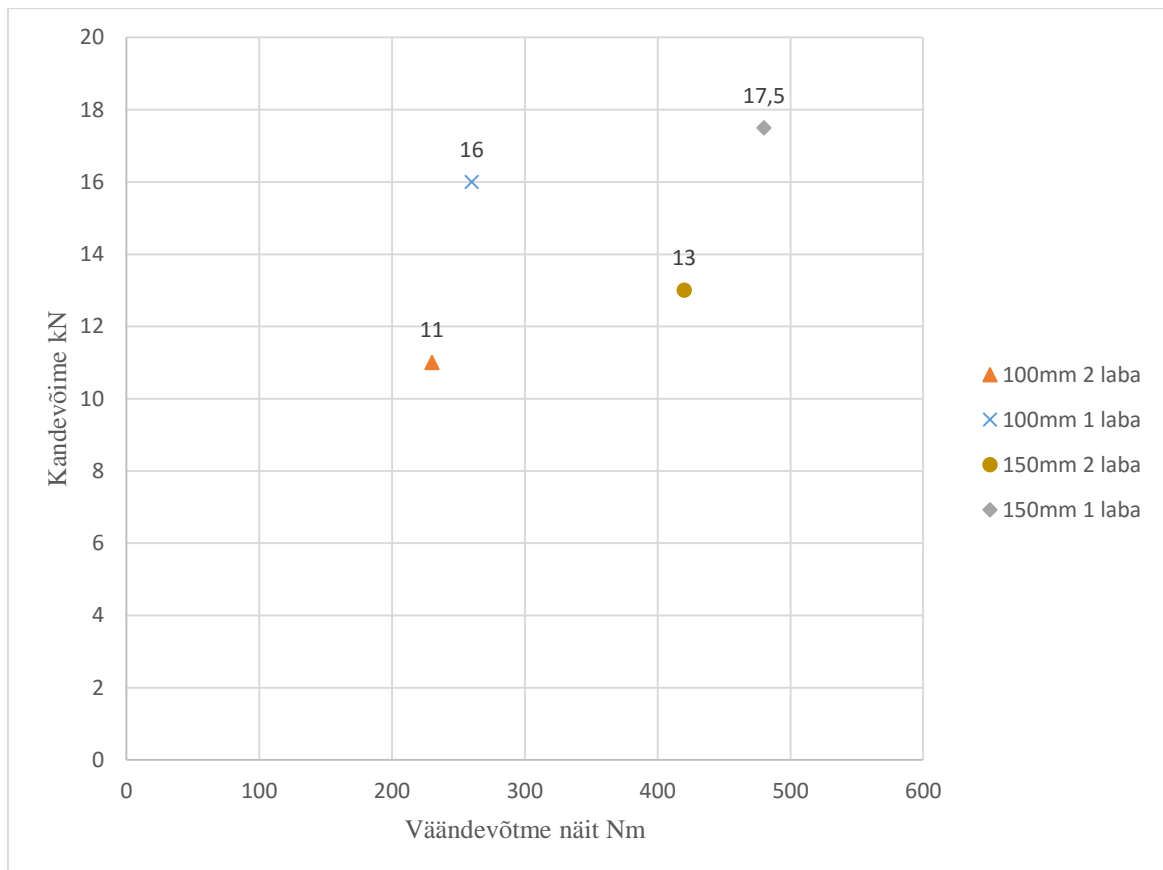
suuremaks vaiad lähevad, seda täpsemaks läheb arvutus, kui võtta K_T määramisel malli Hoyt ja Clemence järeldustest.

Lähtudes kirjanduse analüüsist, suurendati K_T väärtusi survekandevõime määramisel 10%, mis on üsna väike protsent, arvestades et survekandevõime testide järgi oli oluliselt suurem tõmbekandevõimest. Tulemused on arvutatud kahe väändeteguri baasil – 33 ja 42, mida 10% tõstes saadi teguriteks 36 ja 46 vastavalt.

Tabel 4.7. Vaiavõtme näidud, arvutatud kandevõimed ning tegelikud kandevõimed survekatsetel liivapinnases tihedusastmega 0,92.

Vai	Vaiavõtme näit Nm	Kandevõime kui $K_T=36$ N	Kandevõime kui $K_T=46$ N	Tegelik kandevõime N	Varutegur kui $K_T=36$	Varutegur kui $K_T=46$
Vai 1 laba 100mm	250	9000	11500	38000	4,2	3,3
2 laba 100mm	250	9000	11500	38000	4,2	3,3

Nagu arvatud, on täpsus mõlema väändeteguri puhul väga väike. Tekivad väga suured varutegurid, mis ei kajasta enam kandevõimet. Vaiad on väikesed ning nende süvistamissügavus on ebapiisav, et viia tõmbe- ja kandevõime erinevus lähedasemaks. Sellegipoolest ei saa väändeseose meetodit antud vaiadega maha kanda, vaja oleks rohkem katseid, millest selgitada välja väändeteguri korrektne väärtus nende konkreetsete vaiade jaoks. Suurendades väändetegur 150ni, saaksime täpsuseks 98,68%, mis annaks varuteguriks 1,01. Siiski, katseid pole piisavalt, et teha kindlat järeldust sellise väändeteguri määramiseks.



Joonis 4.2. Vaiavõtme näidu ja kandevõime sõltuvus tihendatud pinnases enne tõmbekatse algust.

Tuginedes taas faktile, et kahe labaga vaiad ei vastanud labade paigutuse poolest nõuetele ning vaadates ühte ja kahte laba eraldi, saame tõdeda et vaiavõtme näidu suurenedes tõuseb tõepoolest ka kandevõime. Kandevõime muutumine pole siiski lineaarne. Väändevõtme näit vaial ühe 100mm labaga on 260 Nm ning kandevõime 16 kN. Vaial ühe 150mm labaga on väändevõtme näit 480 Nm ja kandevõime 17,5 kN. Seega vaiavõtme näit suurenes pea kahekordselt, kuid kandevõime muutus oli vaid 1,5 kN. Võrdlusest on välja jäetud labadeta vaiad ning labadega diameetriga 50mm, mille näidud olid liiga väikesed kasutatud võtmega registreerimiseks (Joonis 4.2).

5. Kokkuvõte

Kruvivaiavundament suudab tagada paljude hoonete ja rajatiste vajaliku kandevõime, hoides kokku raha, ressursse, tööjõudu. Põhilisteks kitsaskohtadeks kruvivaiade kasutamisel on pinnas, mis ei tohi olla liiga kivine, samuti ei sobi selline vundament massiivseintega hoonete rajamiseks.

Käesoleva magistritöö põhieesmärkideks oli võrrelda 1 meetrise pikkusega erinevate parameetritega vaiasid, kuidas erinevad nende kandevõimed ning kuidas töötab kaasa pinnas vundamendi mõjutamisel. Vaja oli selgitada kas mõni vai suudab liivapinnases kanda 16 kN tõmbejõudu ning kas on võimalik leida mõni teoreetiline meetod, millega saaks sarnastes mõõtudes vaiu projekteerida. Uuriti ka põhilist objektile kasutatavat väändeseose kontrolli meetodit.

Püstitatud eesmärkide saavutamiseks võeti ette järgnevad tööd:

1. Uuriti teemakohast kirjandust, millega leida kruvivaiade kasutusvaldkondi minevikus ja olevikus, analüüsida arvutusvalemeid ning võrrelda erinevaid meetodeid.
2. Projekteeriti ning konstrueeriti üheksa erinevat katsekeha, katseseade tõmbekandevõime ning survekandevõime avaldamiseks vaiale.
3. Teostati koormuskatsed kolmes seerias. Esimesed kaks seeriat sisaldasid tõmbekandevõimeid erinevate tihedusega pinnases. Kolmas seerial sisaldas väiksemas mahus survekandevõime katseid. Katsetel jälgiti koormust, vaia liikumist ning maapinna liikumist.
4. Analüüsiti saadud tulemusi, koostati tabelleid ja jooniseid tulemuste illustreerimiseks.

Katsetulemused:

Katsetulemused tõestasid hüpoteesi et kahe labaga vaiad ei kannu nii hästi nagu ühe labaga. Ebapiisav labade vahe põhjustab laba töösoonide kattumist, lisaks rikub kaks laba rohkem

pinnase struktuuri kui üks. Ootused et laba diameetri suurenedes kasvab kandevõime vastas tõe, kuid kandevõime kasv polnud 100mm laba ning 150mm labaga vaiade puhul just märkimisväärne. Vähene katsete arv loomulikult ei luba täielikult väita et see vahe ei võiks suurem olla. Maapinna tõus näitas et labadega vaiadel jõuab pinnase nihe maapinna jooneni välja, siledatel vaiadel toimib ainult külghõõre ja seega maapinna tõusu ei kaasne. Loomulikult on siledate ja kruvivaiade kandevõime vahe kordades labadega vaiade kasuks.

Magistritööst huvitunud AS Maru soovis tüüpse PVC halli ankurdamiseks vastust küsimusele kas vaiad võiks sobida vundamendi tegemiseks. Tüüpne hall oli ristlõikelt 15m lai ja 7,4m kõrge. Suurimad koormused postidele, mis tuleks vastu võtta oli 33,3 kN survet, 10,7 kN tõmmet ning 10,7 kN horisontaaljõudu. Survejõu vastu võtmiseks on ette nähtud plaat, mis jagab koormuse pinnasele. Tõmbejõu 10,7 kN korrutades läbi osavaruteguriga 1,5 saame 16,1 kN. Arvestades vaia roomepiiri, võiks sellise koormusega hakkama saada 150 mm ühe labaga kruvivai, mille roomepiiril olev koormus jäi 16 kN ning lõppkoormus 17,5 kN. Pinnaseks oli liiv tihedusastmega 0,92. Eeldusel et pinnase tihedusaste viiakse süvistamisel võimalikult 1 lähedale, saaks kandevõimet veel veidi suurendada. Samas vähene katsete arv ei luba kindlaid järeldusi veel teha. Oleks vaja sooritada rohkem katseid. Lisaks ei ole antud magistritöös uuritud horisontaalkoormust, mis on samuti oluline faktor kandevõime arvutamisel. Varasemalt on uuritud vaia tüvest laiema toru kinnitamist vaia ülemisesse osasse pinnase nulljoone lähedal, mis hajutaks ühtlasemalt koormust. Ka seda tuleks uurida enne lõplike lahenduste pakkumist.

Kahjuks ei sobinud ükski arvutusmudel selles lõputöös katseatud vaiade arvutamiseks. Uue valemi välja käimine vajaks pisut rohkem katseid, selles lõputöös on sooritatud 22 katset kolme seeriana ning iga katse erineb teisest mingi parameetri võrra (erinev pinnasetihedus, vaia läbimõõt jne).

Tänuavaldused

Töö autor soovib tänada Eesti Maaülikooli labori kasutamise võimaluse eest, Andres Kauri katsekehade hankimise eest ning juhendajaid Villu Leppikut ja Mait Metsa nõu ja jõu eest lõputöö kirjutamisel.

Summary

Screw piles can provide a sufficient foundation for many structures, with cuts in cost, resources and required work force. Main negatives of such foundations are soil restrictions and it is not suitable for a structure with massive load bearing walls.

The main purpose of this master's thesis is to compare one meter long helical piles with different parameters, and see their load bearing capabilities. In addition, soil and its elevation during tests were also monitored. The aim was to investigate if any of the test subjects was capable of bearing 16 kN of tension force. Moreover, theoretical methods were analyzed to see if any one of them was suitable to design piles with similar dimensions. Also, torque correlation method was studied.

In order to find conclusions to such purposes, following steps were made:

1. Literature on the subject was reviewed, more precisely history and usage of piles in the modern world as well as methods to design piles firsthand.
2. Nine different test subjects and testing device for both tension and compression were designed.
3. Laboratory tests were carried out in three series. In the first two series, tension was evaluated on sandy soil with different densities. In the third series, compressive capacity was investigated on a certain selection of subjects. During the tests, load bearing and elevation of both test subject and soil was monitored.
4. Results were analyzed, tables and figures were made to illustrate and explain said tests.

Test results proved that piles with two helices are worse than piles with one helix. Insufficient spacing between helices causes load zones to overlap, in addition, two helices break the structure of soil more than one. Expectation of rise of helix diameter to cause increased load capacity were proven to be true, however the difference between 100 to 150 mm diameter wasn't as grand as it was assumed to be. Due to low number of tests, it is early

to conclude that 150 mm cannot be more effective. The results on elevation of the soil illustrated that piles with one or two helices moved the soil in larger diameter all the way to the surface of the ground. Piles with no helices worked only with friction caused by shaft, so no soil movement was registered. It can be concluded with absolute certainty that a pile with an added helix no matter the diameter increases load bearing by a great amount.

A task was presented by Maru Co. to find out a pile with minimum necessary dimensions that can support their lightweight PVC storage building. The building had a wall span of 15 meters and height of 7,4 meters. Maximum loads in one column were 33,3 kN of compression, 10,7 kN of tension and 10,7 kN of horizontal forces. Compressive forces were meant to be dispersed to the ground by a plate attached on the ground. Tension force of 10,7 kN was multiplied by a factor of 1,5, thus resulting in 16,1 kN. Taking creep deformation under consideration, helical pile with one 150 mm diameter helix would suffice in resisting such forces. Sandy soil had a density factor of 0,92, assuming we could elevate it to nearly 1, ultimate capacity would also even further. On the other hand, lack of tests does not allow 100% accurate conclusions. More tests are needed to be made to confirm results and explore the subject further. In addition, in this thesis, horizontal load was ignored completely, which factors in on the bearing capacity.

Unfortunately, none of the methods studied in literature review proved effective in designing piles with similar dimensions. Deriving a new method would require once again more tests, since this thesis had only unique tests, meaning that every test had a parameter that was different from another.

Viidatud allikad

- [1] W. Guthlac, „The Bearing Capacity of Screw Piles and Screwcrete Cylinders" Vol 34," pp. 4-93, 1950.
- [2] A. J. Lutenecker, „Historical Development of Iron Screw-Pile foundations: 1836-1900," 2011.
- [3] A. Mitchell, „On submarine foundations, particularly the screw-pile and moorings".
- [4] H. M. Denham, „Wyre Lighthouse," pp. 181-182, 1840.
- [5] „The Illustrated sailors' magazine, and new nautical miscellany. Vol 1," 1845.
- [6] J. B. Redman, „An account of the Maplin Sands Lighthouse, at the mouth of the River Thames," pp. 146-154, 1849.
- [7] S. Clemence, R. Thorsten ja B. Edwards, „Helical Anchors: Overview of Application and Design," pp. 8-12, 1990.
- [8] M. P. Systems, „Helical Foundations Systems Engineering Manual," p. 5, 2010.
- [9] R. W. Stephenson, „Helical Foundations and Tie Backs," pp. 3-4, 1997.
- [10] T. Lunne, P. K. Robertson ja J. Powell, „Cone penetration testing in geotechnical practice," pp. 76-107, 1997.

- [11] H. Niroumand, K. A. Kassim, A. Ghafooripour, R. Nazir ja H. Chuan, „Performance of helical anchors in sand,“ p. 2685, 2012.
- [12] B. M. Das, „Shallow Foundations. Bearing Capacity and Settlements,“ 1999.
- [13] W. Bogusz, „Ultimate limit state design of spread foundations in the case of uplift,“ p. 144, 2016.
- [14] F. H. Kulhawy, H. E. Stewart ja C. H. Trautmann, „On the uplift behaviour of spread foundations,“ 2003.
- [15] „IEEE Standard 691-2001. IEEE guide for transmission structure foundation design and testing.,“ 2001.
- [16] A. Balla, „The resistance to breaking out of mushroom foundations for pylons,“ 1961.
- [17] A. Ghaly ja A. Hanna, „Uplift behaviour of Screw Anchors,“ pp. 773-793, 1991.
- [18] G. G. Meyerhof ja J. I. Adamsn, „The ultimate uplift capacity of foundations,“ 1968.
- [19] N. Pandit, R. Chaney ja H. Fang, „Review of Cavity Expansion Models in Soil and its Applications,“ 1983.
- [20] A. Vesic, „Cratering by explosives as an earth pressure problem,“ 1965.
- [21] H. S. Saeedy, „Stability of Circular Vertical Earth Anchors,“ 1987.
- [22] A. Mohajerani, D. Bosnjak ja D. Bromwich, „Analysis and design methods of screw piles: A new review,“ 2015.
- [23] J. Kortan, „Predicting Helical Pile Capacity,“ pp. 1-2, 2014.

- [24] A. Lutenecker, B. L. Smith ja M. G. Kabir, „Use of In Situ Tests to Predict Performance of Multihelix Anchors, Proc Special Topics in Foundations,“ 1988.
- [25] R. M. Hoyt ja S. P. Clemence, „Uplift Capacity of Helical Anchors in Soil,“ pp. 2-5; 1019-1022, 1989.
- [26] M. P. Mitsch ja S. Clemence, „The uplift capacity of helix anchors in sand. Uplift behavior of anchor foundations in soil. Proceedings of ASCE,“ pp. 26-47, 1985.
- [27] N. Rao ja S. Prasad, „Estimation of uplift capacity of helical anchors in clays,“ pp. 352-357, 1993.
- [28] Chance, „Basic Guidelines for Designing Helical Piers for Underpinning,“ 1993.
- [29] M. H. Nasr, „Performance based design for helical piles. In: Contemporary Topics in Deep Foundations,“ pp. 496-503, 2009.
- [30] M. H. Nasr, „Large capacity screw piles,“ pp. 1-15, 2004.
- [31] S. R. Narashima, Y. V. S. N. Prasad ja M. D. Shetty, „The behaviour of model screw piles in cohesive soils, Soils and Foundations 31,“ pp. 35-50.
- [32] M. Sakr, „Performance of helical piles in oil sand“.
- [33] „Latvian building code LBN 214-03 Geotechnics. Pile foundations and footings,“ 2003.
- [34] A. Sprince ja L. Pakrastinsh, „Helical pile behaviour and load transfer mechanism in different soils,“ pp. 2-7.
- [35] J. Rohusaar, O. Pukk, K. Õiger, E. Just, A. Just, V. Hartšuk, R. Mägi, M. Tiit, I. Talvik, V. Voltri, K. Loorits ja T. Peipmaa, „Ehituskonstruktori käsiraamat 4. trükk,“ p. 243, 2014.

- [36] C. Robertson, „Guidelines for geotechnical design using CPT and CPTU. Civil Engineering Department, University of British Columbia,“ 1988.
- [37] H. A. Perko, „Helical Piles,“ pp. 176-179, 2009.
- [38] T. Kull, „Vaialuse kandevõime,“ p. 43, 2014.
- [39] E. Vares, „Kiilvaimodelite kandevõime liivas ja süvistamisel toimuvad pinnasemuutused,“ p. 33, 2015.

Lisad

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Kuido Kangur, (sünnipäev 23.08.1992)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö „Lühikeste kruvivaiade kandevõime ja käitumise uuring“, mille juhendajad on lektor Villu Leppik ja doktor Mait Mets,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
allkiri

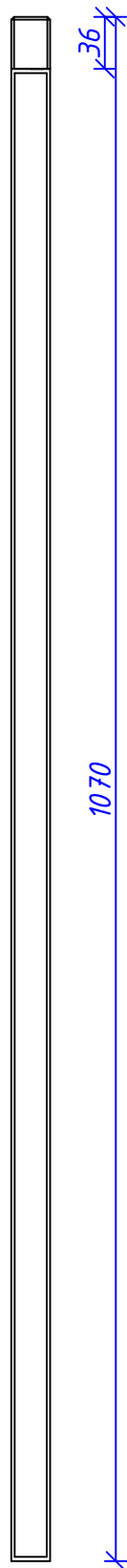
Tartu, 2017

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

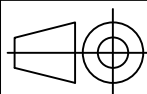
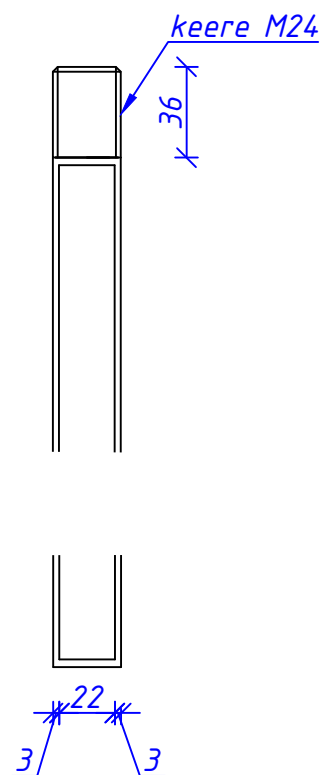
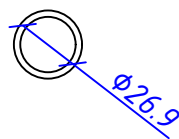
Luban lõputöö kaitsmisele.

Mait Mets	22.05.17
_____ (juhendaja nimi ja allkiri)	_____ (kuupäev)
Villu Leppik	22.05.17
_____ (juhendaja nimi ja allkiri)	_____ (kuupäev)

Lisa 1. Katsekehade ja katseseadme joonised



Sile toru
 $\Phi 26.9\text{mm}$



Töö nimetus:

Lõputöö tehnilised joonised

Mõõt:

1:5; 1:3

Joonestas

Kuido Kangur

02.11.2016

Objekti nimetus:

Katsekehade eskiisid

Juhendas

Villu Leppik



Eesti Maaülikool
 Estonian University of Life Sciences

Metsandus- ja maaehitusinstituut
 Institute of Forestry and Rural Engineering

www.emu.ee

Joonise nimetus:

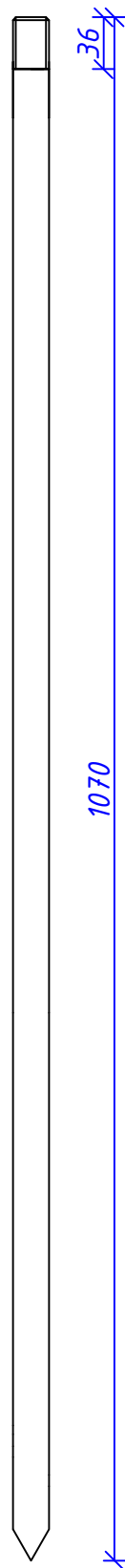
Sile toru 26.9mm

Leht 1

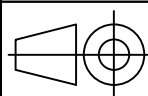
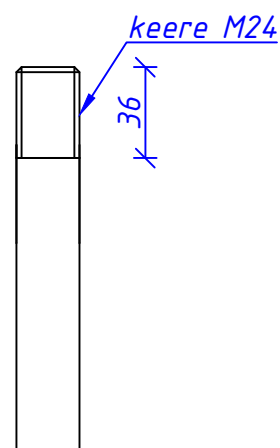
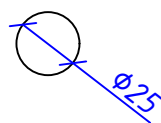
Õpinguraamatu nr:

Lehti 13

MI-110321



Sile armatuur
 $\varnothing 25\text{mm}$



Töö nimetus:

Lõputöö tehnilised joonised

Mõõt:

1:5; 1:3

Joonestas

Kuido Kangur

02.11.2016

Objekti nimetus:

Katsekehade eskiisid

Juhendas

Villu Leppik



Eesti Maaülikool
 Estonian University of Life Sciences

Metsandus- ja maaehitusinstituut
 Institute of Forestry and Rural Engineering

www.emu.ee

Joonise nimetus:

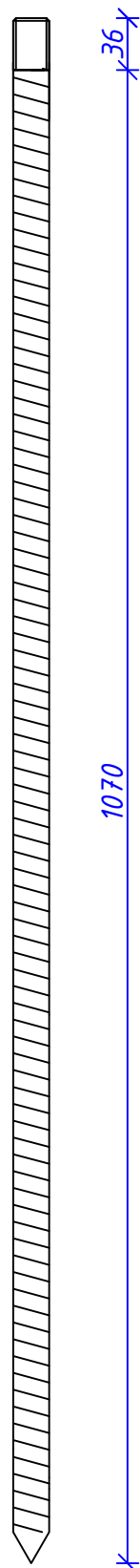
Sile sarrus 25mm

Leht 2

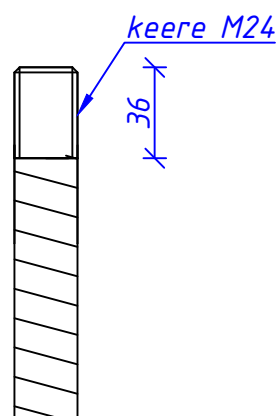
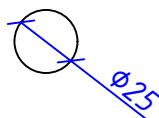
Õpinguraamatu nr:

Lehti 13

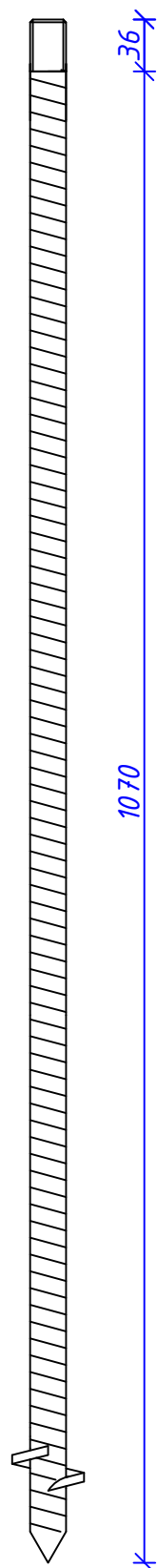
MI-110321



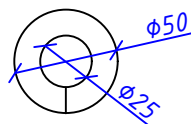
Armatuur
 $\phi 25\text{mm}$



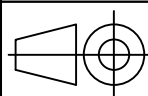
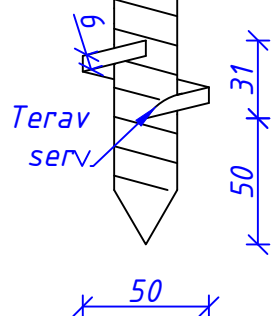
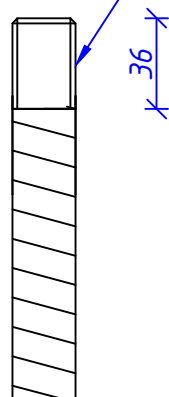
	Töö nimetus: Lõputöö tehnilised joonised			Mõõt: 1:5; 1:3	
Joonestas	Kuido Kangur		02.11.2016	Objekti nimetus: Katsekehade eskiisid	
Juhendas	Villu Leppik				
Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maaehitusinstituut Institute of Forestry and Rural Engineering www.emu.ee				Joonise nimetus: Sarrus 25mm	
				Leht 3	Õpinguraamatu nr: MI-110321
				Lehti 13	



Kruvivai $\phi 25\text{mm}$,
labaga $\phi 50\text{mm}$



keere M24



Töö nimetus:

Lõputöö tehnilised joonised

Mõõt:

1:5; 1:3

Joonestas

Kuido Kangur

02.11.2016

Objekti nimetus:

Katsekehade eskiisid

Juhendas

Villu Leppik



Eesti Maaülikool

Estonian University of Life Sciences

Metsandus- ja maaehitusinstituut
Institute of Forestry and Rural Engineering

www.emu.ee

Joonise nimetus:

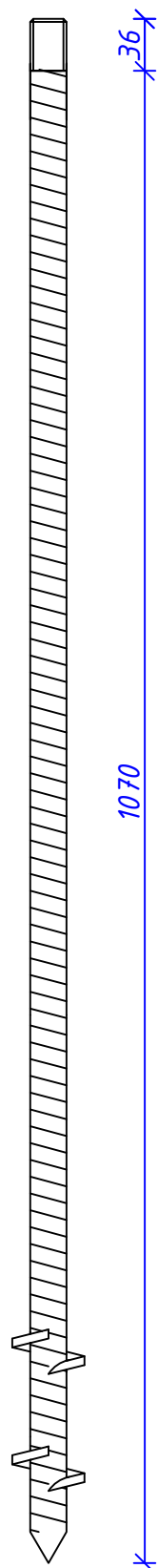
Kruvivai 25mm, 50mm labaga

Leht 4

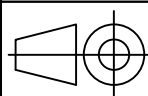
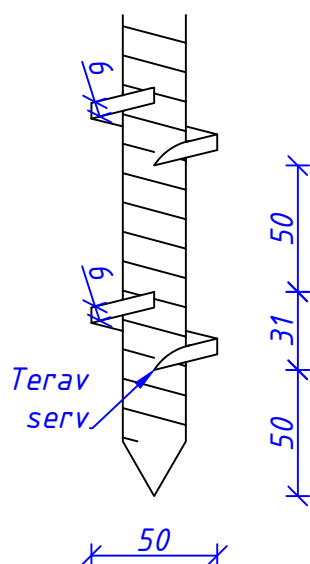
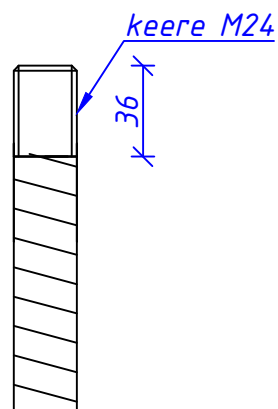
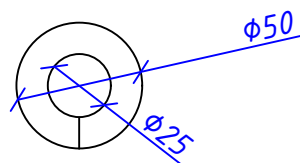
Õpinguraamatu nr:

Lehti 13

MI-110321



Kruvivai $\Phi 25\text{mm}$,
kahe labaga $\Phi 50\text{mm}$



Töö nimetus:

Lõputöö tehnilised joonised

Mõõt:

1:5; 1:3

Joonestas

Kuido Kangur

02.11.2016

Objekti nimetus:

Katsekehade eskiisid

Juhendas

Villu Leppik



Eesti Maaülikool

Estonian University of Life Sciences

Metsandus- ja maaehitusinstituut
Institute of Forestry and Rural Engineering

www.emu.ee

Joonise nimetus:

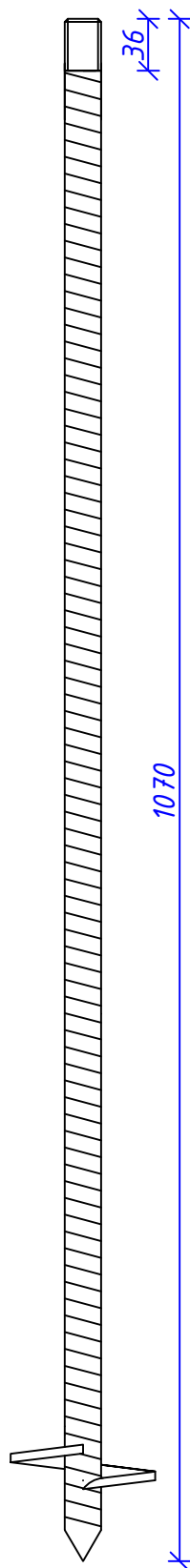
Kruvivai 25mm, kahe 50mm labaga

Leht 5

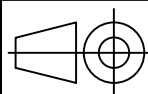
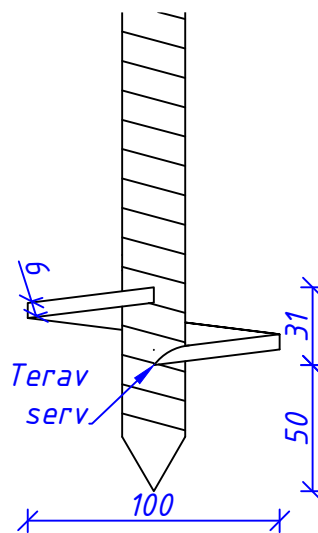
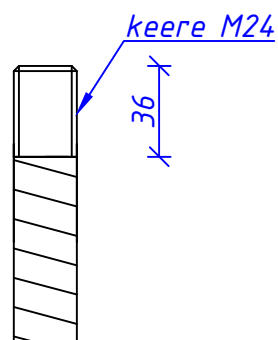
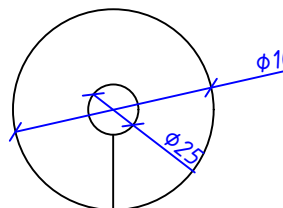
Õpinguraamatu nr:

Lehti 13

MI-110321



Kruvivai $\phi 25\text{mm}$,
labaga $\phi 100\text{mm}$



Töö nimetus:

Lõputöö tehnilised joonised

Mõõt:

1:5; 1:3

Joonestas

Kuido Kangur

02.11.2016

Objekti nimetus:

Katsekehade joonised

Juhendas

Villu Leppik



Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Metsandus- ja maaehitusinstituut
Institute of Forestry and Rural Engineering

www.emu.ee

Joonise nimetus:

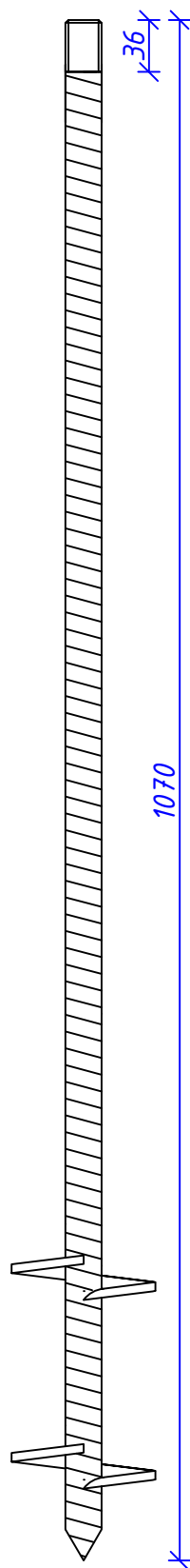
Kruvivai 25mm, 100mm labaga

Leht 6

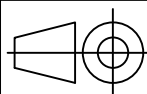
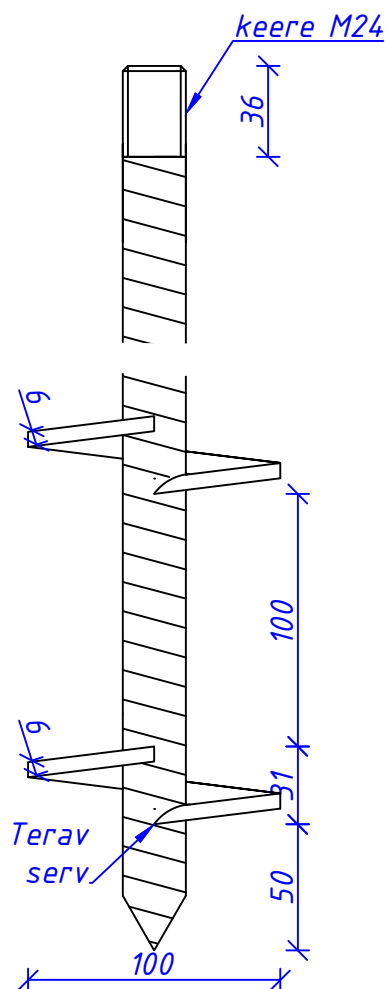
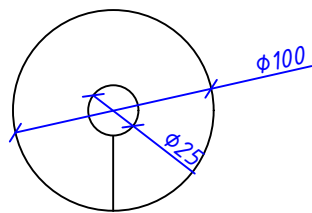
Õpinguraamatu nr:

Lehti 13

MI-110321



Kruvivai $\phi 25\text{mm}$, kahe
labaga $\phi 100\text{mm}$



Töö nimetus:

Lõputöö tehnilised joonised

Mõõt:

1:5; 1:3

Joonestas

Kuido Kangur

02.11.2016

Objekti nimetus:

Katsekehade joonised

Juhendas

Villu Leppik



Eesti Maaülikool

Estonian University of Life Sciences

Metsandus- ja maaehitusinstituut
Institute of Forestry and Rural Engineering

www.emu.ee

Joonise nimetus:

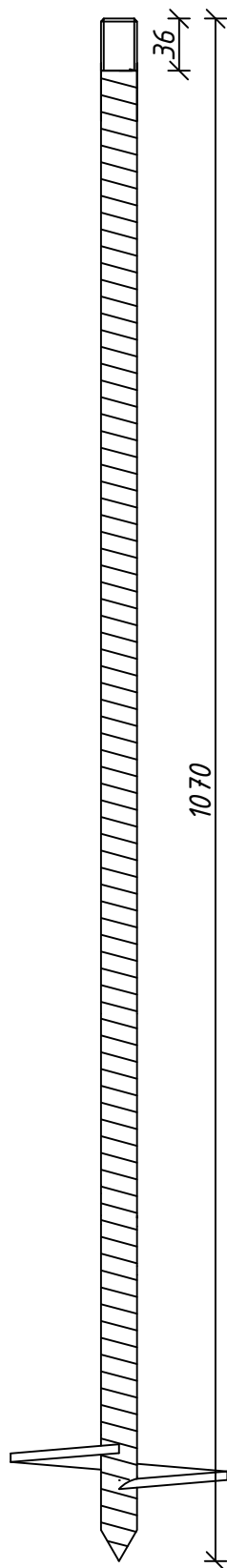
Kruvivai 25mm, kahe 100mm labaga

Leht 7

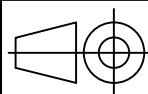
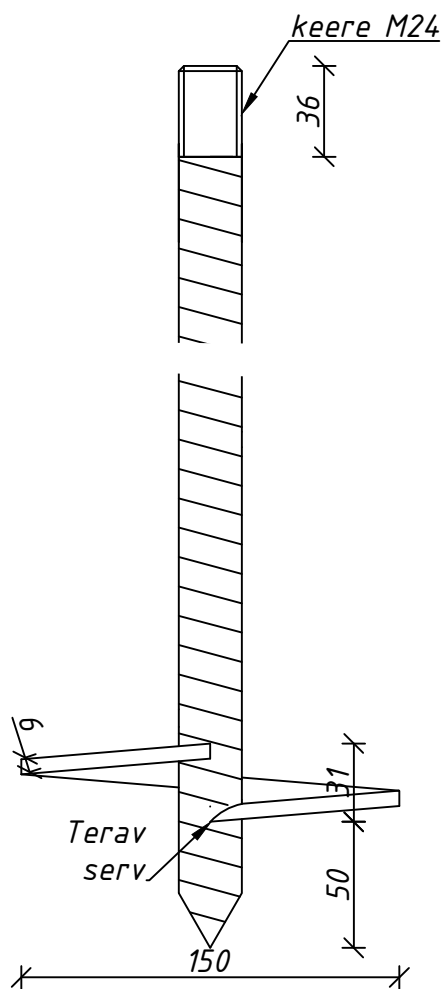
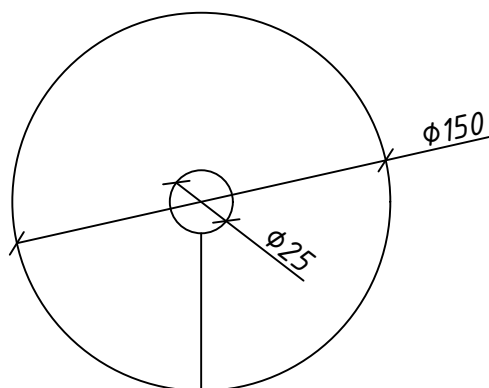
Õpinguraamatu nr:

Lehti 13

MI-110321



Kruvivai $\phi 25\text{mm}$,
labaga $\phi 150\text{mm}$



Töö nimetus:

Lõputöö tehnilised joonised

Mõõt:

1:5; 1:3

Joonestas

Kuido Kangur

02.11.2016

Objekti nimetus:

Katsekehade joonised

Juhendas

Villu Leppik



Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Metsandus- ja maaehitusinstituut
Institute of Forestry and Rural Engineering

www.emu.ee

Joonise nimetus:

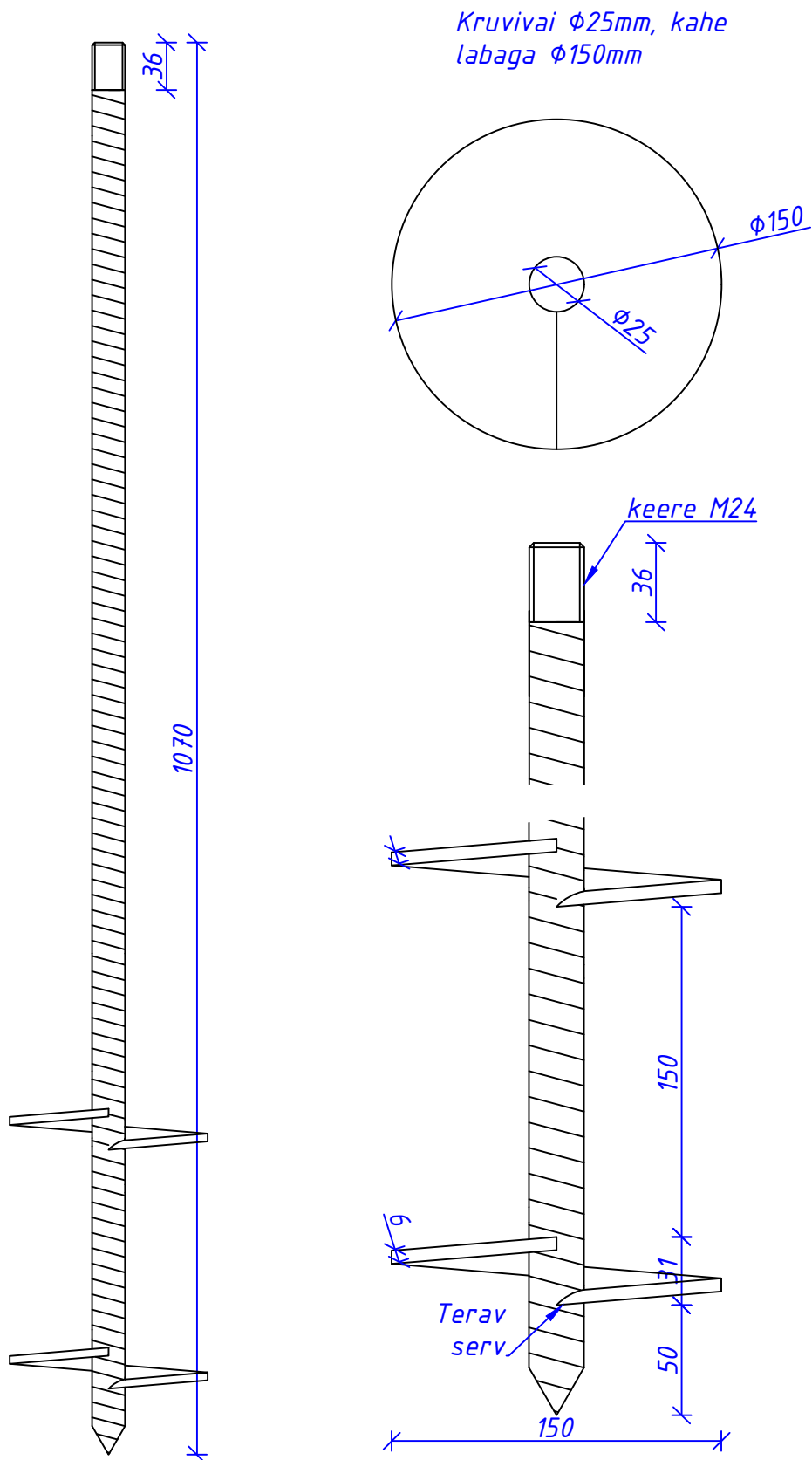
Kruvivai 25mm, 150mm labaga

Leht 8

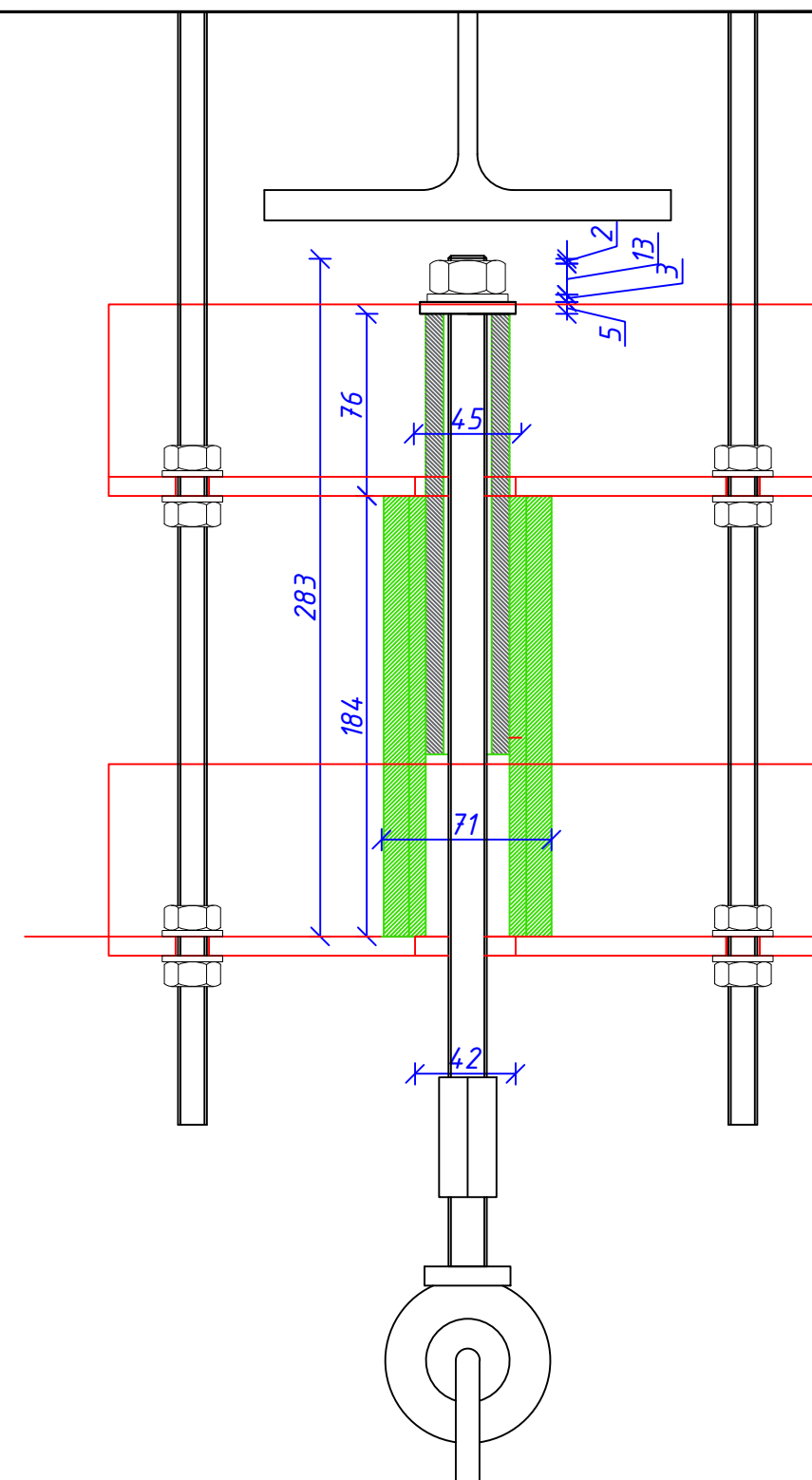
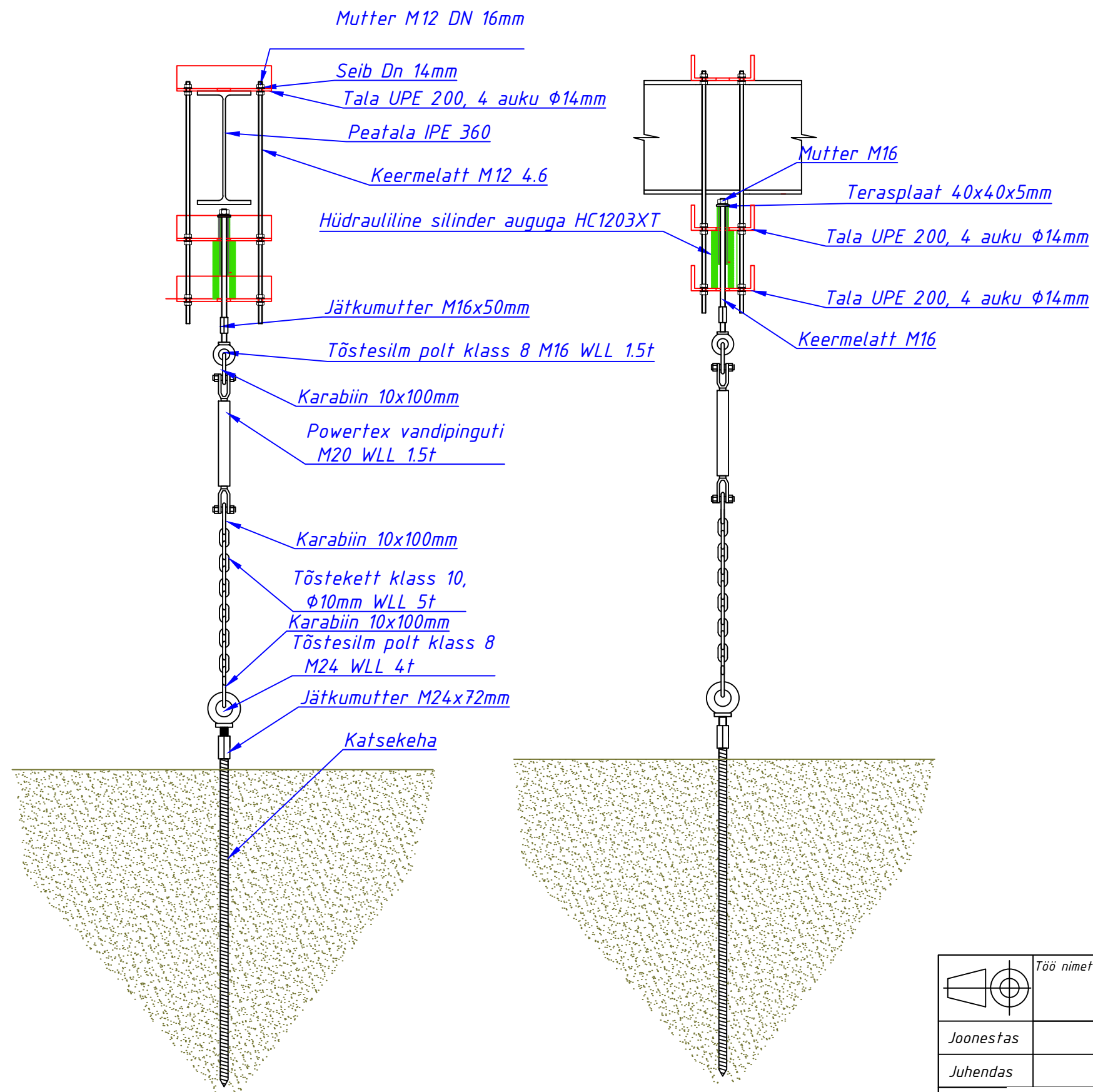
Õpinguraamatu nr:

Lehti 13

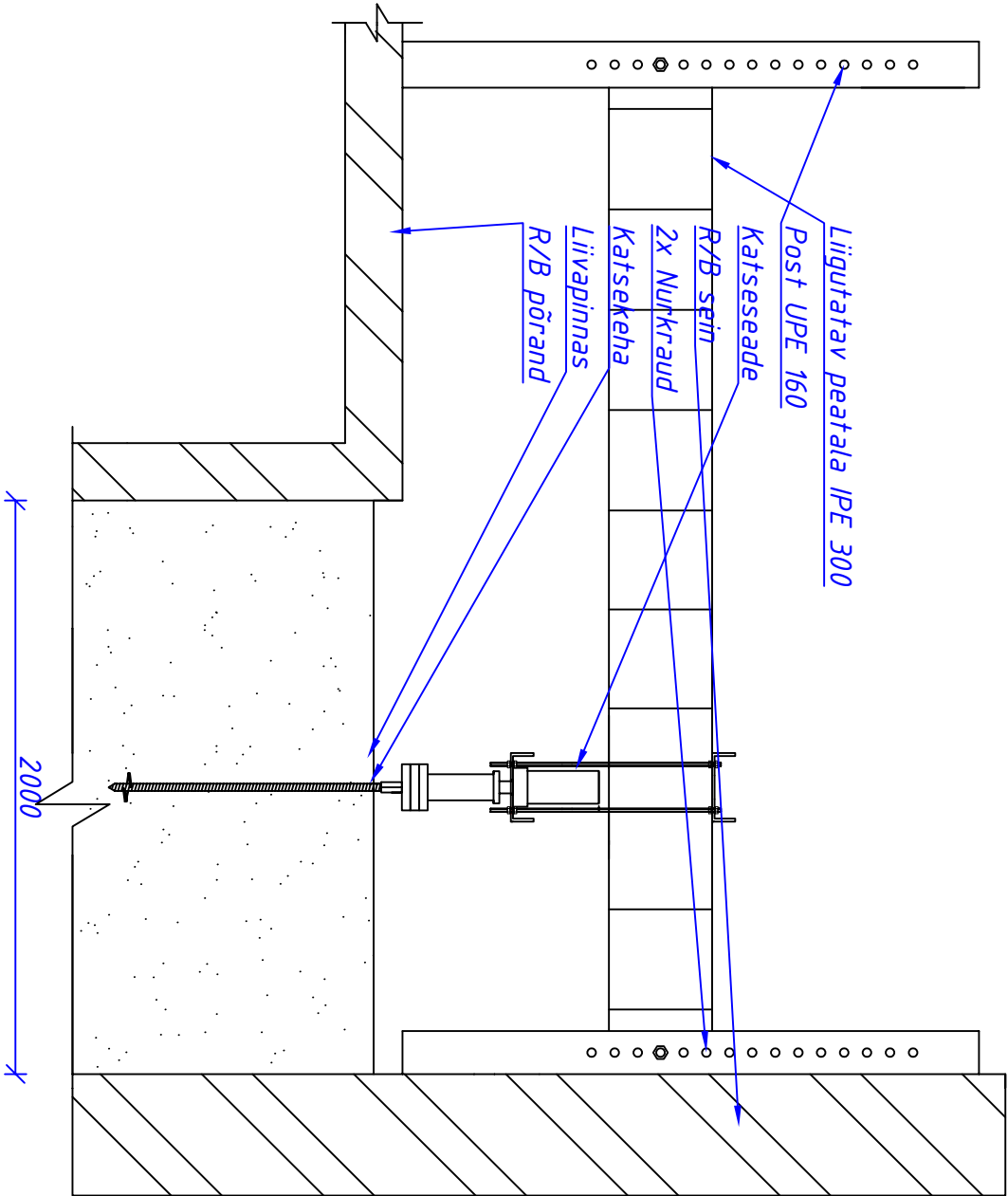
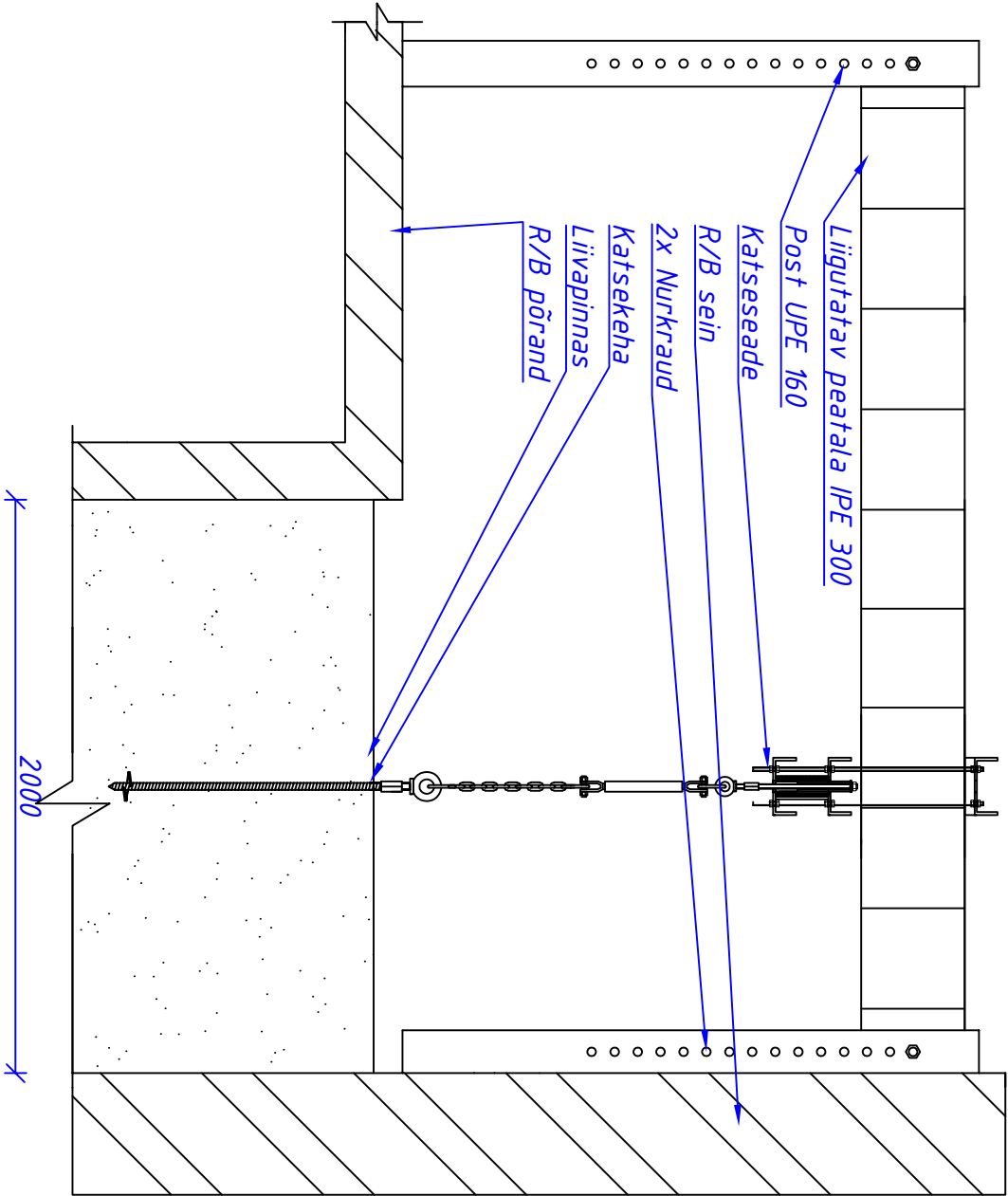
MI-110321





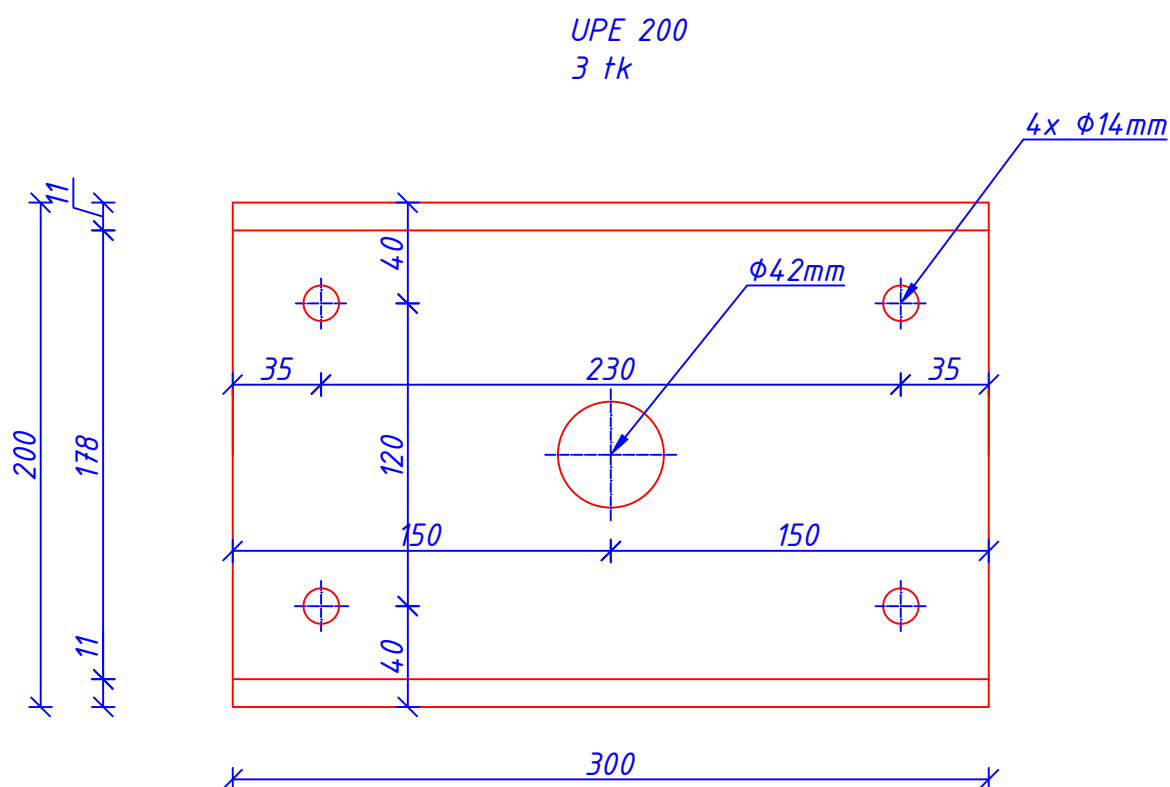
	Töö nimetus: Lõputöö tehnilised joonised			Mõõt: 1:5; 1:3	
Joonestas	Kuido Kangur		02.11.2016	Objekti nimetus: Katsekehade joonised	
Juhendas	Villu Leppik				
Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maaehitusinstituut Institute of Forestry and Rural Engineering				Joonise nimetus: Kruvivai 25mm, kahe 150mm labaga	
				Leht 9	Õpinguraamatu nr: MI-110321
				Lehti 13	



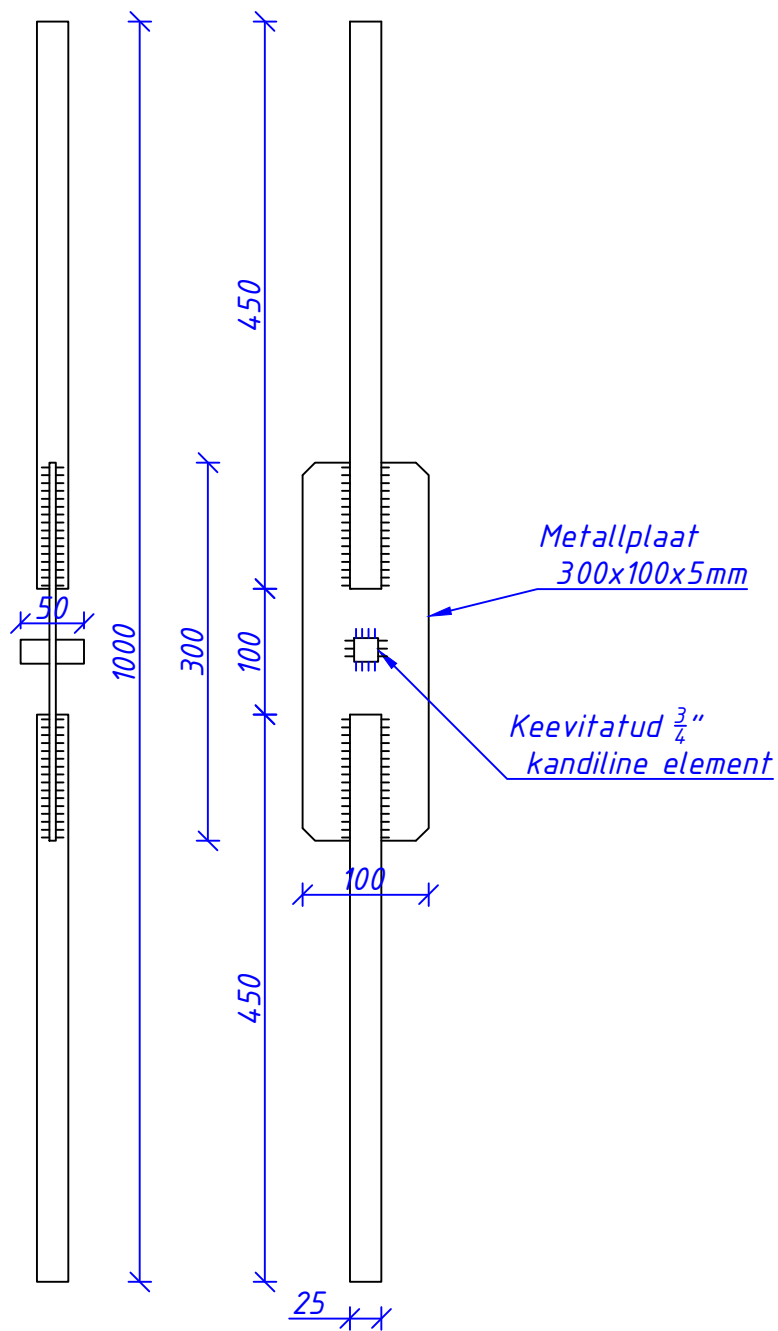
	Töö nimetus: Lõputöö tehnilised joonised			Mõõt: 1:15; 1:3
Joonestas	Kuido Kangur	02.11.2016	Objekti nimetus: Katse joonised	
Juhendas	Villu Leppik			
Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maaehitusinstituut Institute of Forestry and Rural Engineering			Joonise nimetus: Katse skeem	
			Leht 10	Õpinguraamatu nr: MI-110321
			Lehti 13	



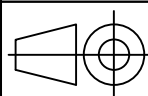
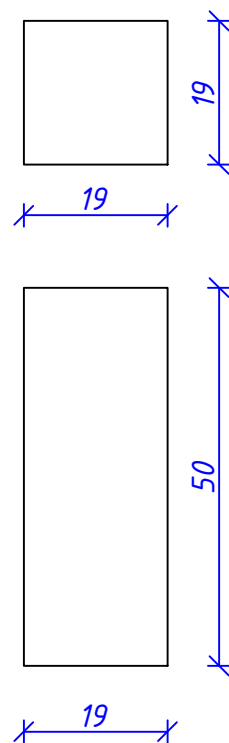
	Töö nimetus:	Lõputöö tehnilised joonised			Mõõt:	1:25
Joonestab	Kuido Kangur		02.11.2016	Objekti nimetus:	Katsse joonised	
Juhendas	Vilju Leppik			Joonise nimetus:	Liivakasti skeem koos tõmbe- ja surveaadri	
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maaehitusteaduste instituut Institute of Forestry and Rural Engineering				Leht 10-2 Õpinguraamatu nr: M1-110321		



	Töö nimetus: Lõputöö tehnilised joonised				Mõõt: 1:3
Joonestas	Kuido Kangur		02.11.2016	Objekti nimetus: Detailide joonised	
Juhendas	Villu Leppik				
Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maaehitusinstituut Institute of Forestry and Rural Engineering www.emu.ee				Joonise nimetus: UPE 200 tala eskiis Leht 11 Õpinguraamatu nr: Lehti 13 MI-110321	



Padruni kinnitus detail



Töö nimetus:

Lõputöö tehnilised joonised

Mõõt:

1:6; 1:1

Joonestas

Kuido Kangur

02.11.2016

Objekti nimetus:

Detailide joonised

Juhendas

Villu Leppik



Eesti Maaülikool

Estonian University of Life Sciences

Metsandus- ja maaehitusinstituut
Institute of Forestry and Rural Engineering

www.emu.ee

Joonise nimetus:

Vaiavõtme eskiis

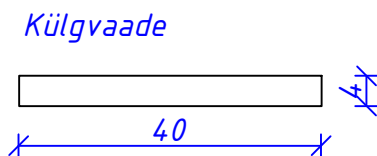
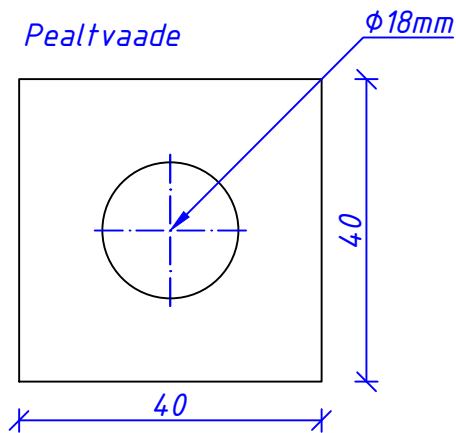
Leht 12

Õpinguraamatu nr:

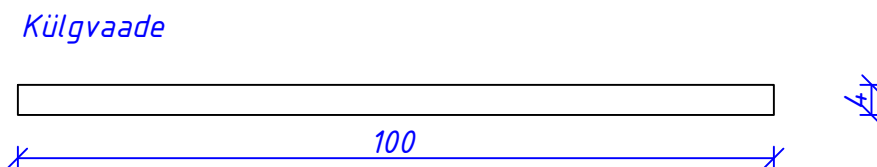
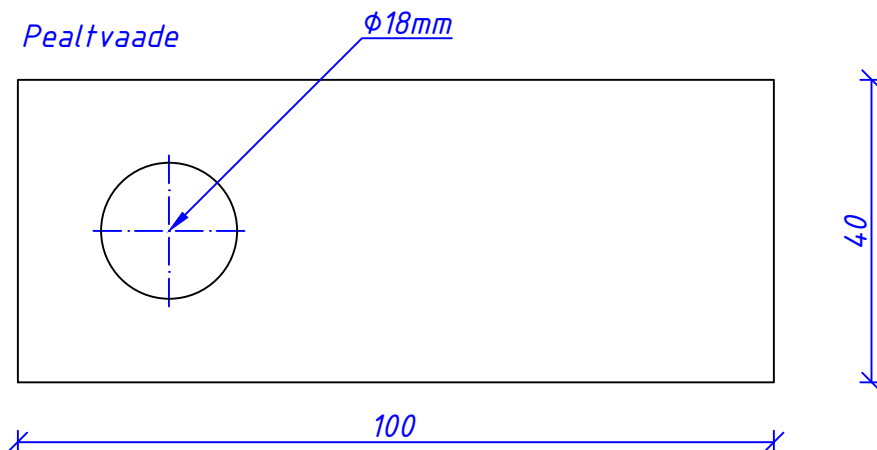
Lehti 13

MI110321

Terasplaat 40x40x4mm auguga $\Phi 18\text{mm}$



Terasplaat 100x40x4mm auguga $\Phi 18\text{mm}$



	Töö nimetus: <i>Lõputöö tehnilised joonised</i>				Mõõt: 1:1
Joonestas	Kuido Kangur		02.11.2016	Objekti nimetus: <i>Detailide joonised</i>	
Juhendas	Villu Leppik			Joonise nimetus: <i>Terasplaat 40x40x4mm ning 100x40x4mm</i>	
<p>Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maaehitusinstituut Institute of Forestry and Rural Engineering</p>				Leht 13 Õpinguraamatu nr: MI-110321 Lehti 13	

Lisa 2. Katseprotokollid

Katsevai: KV 1 – Sile toruvai 26.9x2.5mm**1. Väändekatse**

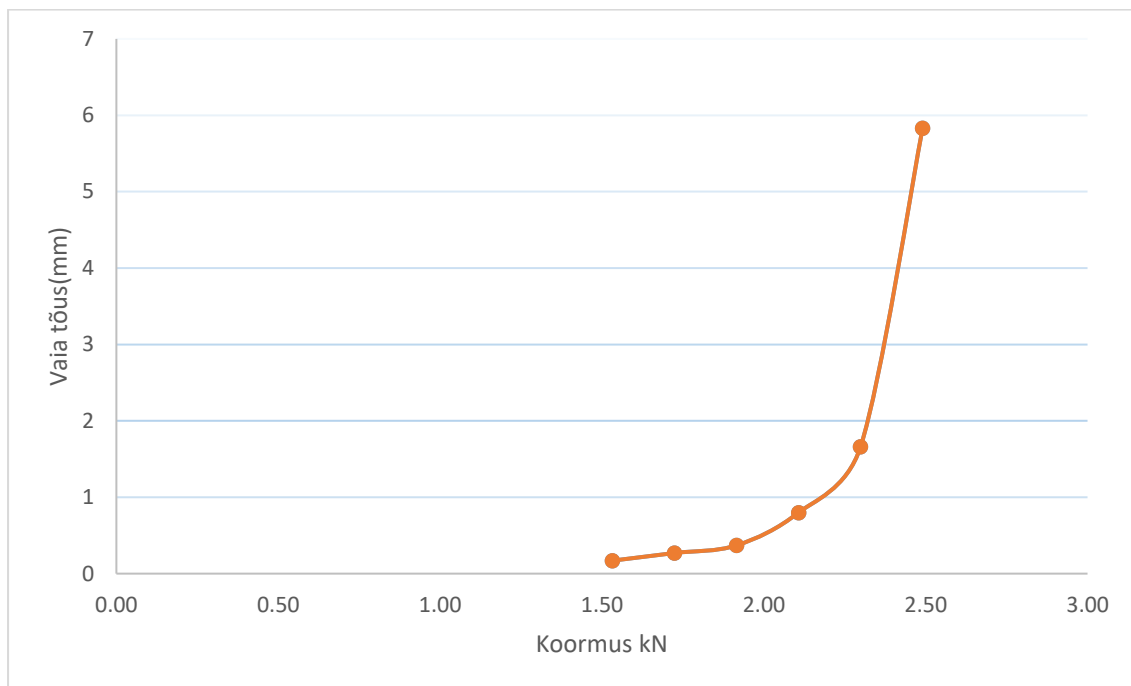
Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

Katse number	Vaia sügavus pinnases(mm)	Vajum(mm)
1	730	33
2	830	27
3	920	25

2. Staatileine koormuskatse tõmbele

Tabel 2.1 Staatilese tõmbekatse mõõtetulemused

Katse seeria nr	Õlirõhk süsteemis bar	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	2.16	0
1	8.0	1.53	1	2.30	0.14
			3	2.32	0.16
			5	2.33	0.17
2	9.0	1.72	1	2.41	0.25
			3	2.43	0.27
			5	2.43	0.27
3	10.0	1.92	1	2.49	0.33
			3	2.52	0.36
			5	2.53	0.37
4	11.0	2.11	1	2.79	0.63
			3	2.93	0.77
			5	2.96	0.8
5	12.0	2.30	1	3.44	1.28
			3	3.74	1.58
			5	3.82	1.66
6	13.0	2.49	1	5.32	3.16
			3	6.63	4.47
			7	7.59	5.43
			10	7.99	5.83



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

Katsevai: KV 2 – Sile vai 25mm**1. Väändekatse**

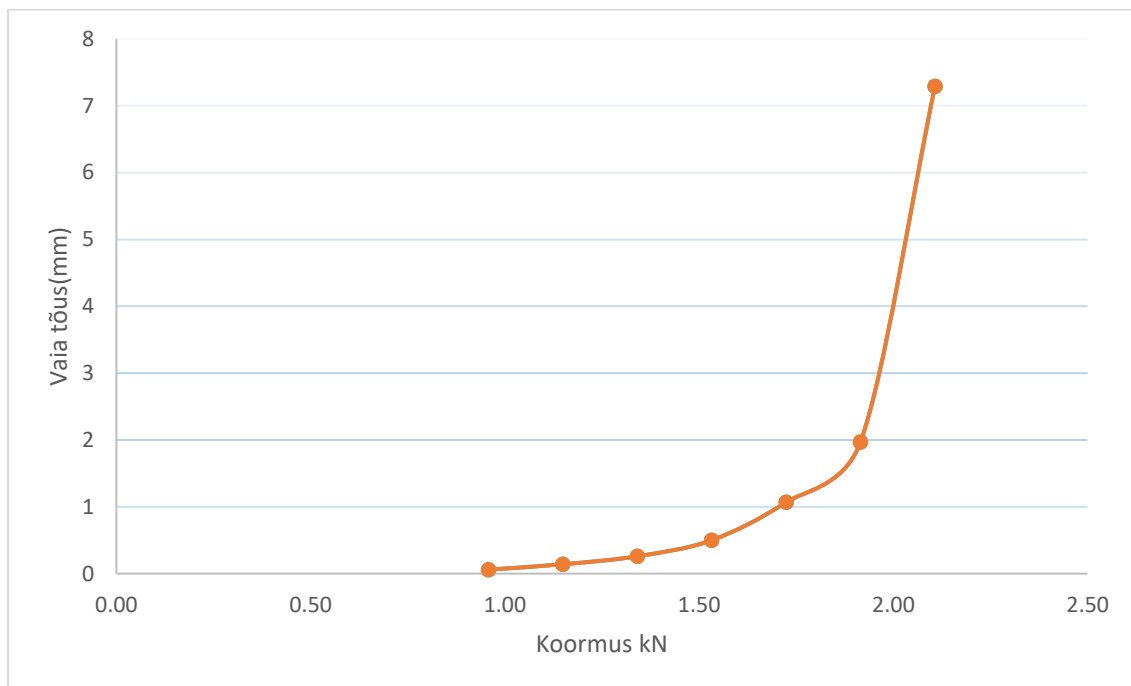
Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

Katse number	Vaia sügavus pinnases(mm)	Vajum(mm)
1	700	35
2	780	35
3	910	29

2. Staatileine koormuskatse tõmbele

Tabel 2.1 Staatileise tõmbekatse mõõtetulemused

Katse seeria nr	Õlirõhk süsteemis bar	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	2.40	0
1	5.0	0.96	1	2.41	0.01
			3	2.45	0.05
			7	2.46	0.06
			10	2.46	0.06
2	6.0	1.15	1	2.51	0.11
			3	2.52	0.12
			7	2.53	0.13
			10	2.54	0.14
3	7.0	1.34	1	2.61	0.21
			3	2.62	0.22
			5	2.66	0.26
			10	2.66	0.26
4	8.0	1.53	1	2.75	0.35
			3	2.81	0.41
			7	2.88	0.48
			10	2.90	0.5
5	9.0	1.72	1	3.25	0.85
			3	3.36	0.96
			7	3.44	1.04
			10	3.47	1.07
6	10.0	1.92	1	4.02	1.62
			3	4.13	1.73
			7	4.23	1.83
			10	4.37	1.97
7	11.0	2.11	1	5.33	2.93
			3	7.52	5.12
			7	8.03	5.63
			10	9.69	7.29



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

Katsevai: KV 3 – Vai 25mm**1. Väändekatse**

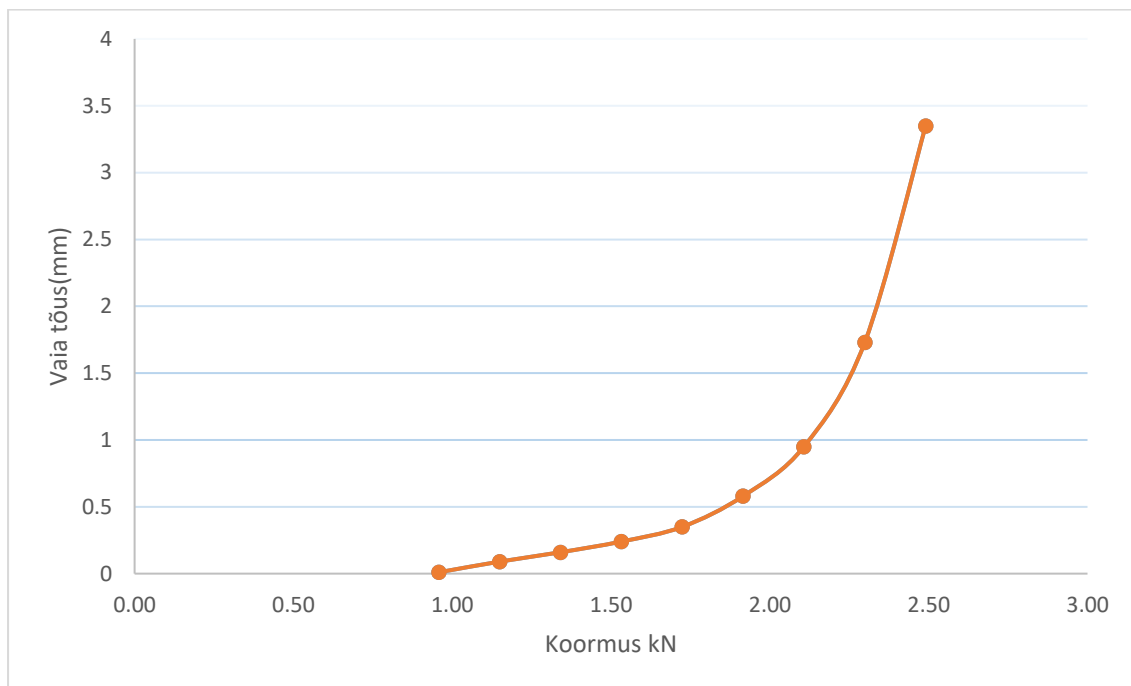
Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

Katse number	Vaia sügavus pinnases(mm)	Vajum(mm)
1	796	31
2	850	29
3	900	25

2. Staatileine koormuskatse tõmbele

Tabel 2.1 Staatilese tõmbekatse mõõtetulemused

Katse seeria nr	Õlirõhk süsteemis bar	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	2.43	0
1	5.0	0.96	1	2.44	0.01
			3	2.44	0.01
			5	2.44	0.01
2	6.0	1.15	1	2.51	0.08
			3	2.52	0.09
			5	2.52	0.09
3	7.0	1.34	1	2.57	0.14
			3	2.58	0.15
			5	2.59	0.16
4	8.0	1.53	1	2.65	0.22
			3	2.66	0.23
			5	2.67	0.24
5	9.0	1.72	1	2.72	0.29
			3	2.74	0.31
			5	2.78	0.35
6	10.0	1.92	1	2.94	0.51
			3	2.98	0.55
			5	3.01	0.58
7	11.0	2.11	1	3.29	0.86
			3	3.36	0.93
			5	3.38	0.95
8	12.0	2.30	1	3.97	1.54
			3	4.09	1.66
			5	4.16	1.73
9	13.0	2.49	1	5.13	2.70
			3	5.48	3.05
			5	5.78	3.35
10	14.0	2.68	1	8.03	5.60
			3	9.6	7.17
			5	10.34	7.91



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

Katsevai: KV 4 – ühe labaga vai, laba mõõt 50 mm

1. Väändekatse

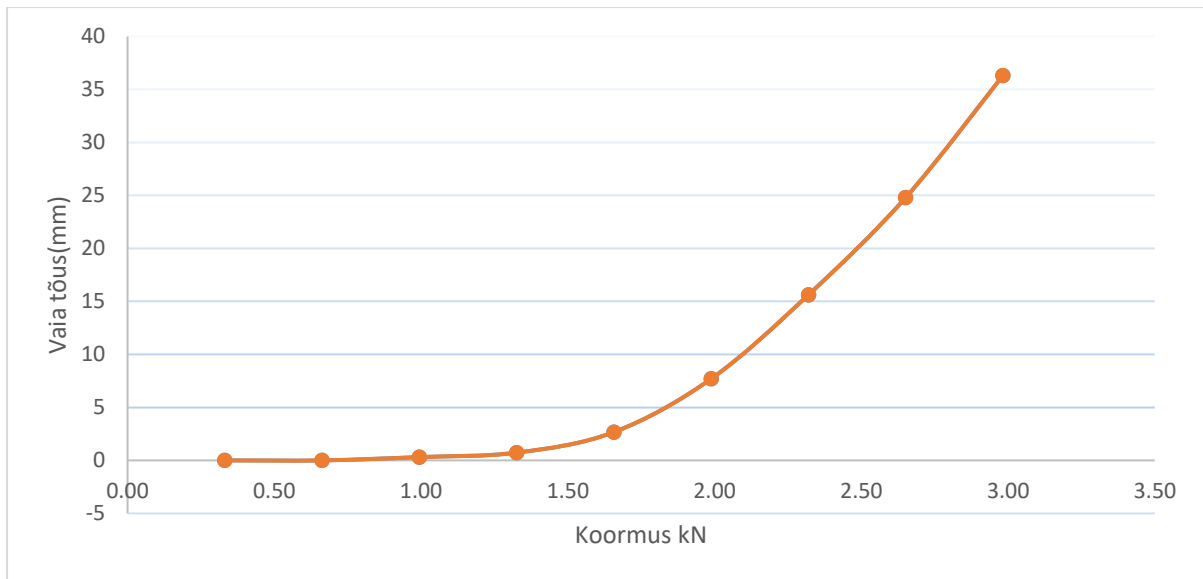
Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

Katse number	Väändevõtme näit Nm	Katsetulemus
1	140	Ei andnud tulemust

2. Staatileine koormuskatse tõmbele

Tabel 2.1 Staatilese tõmbekatse mõõtetulemused

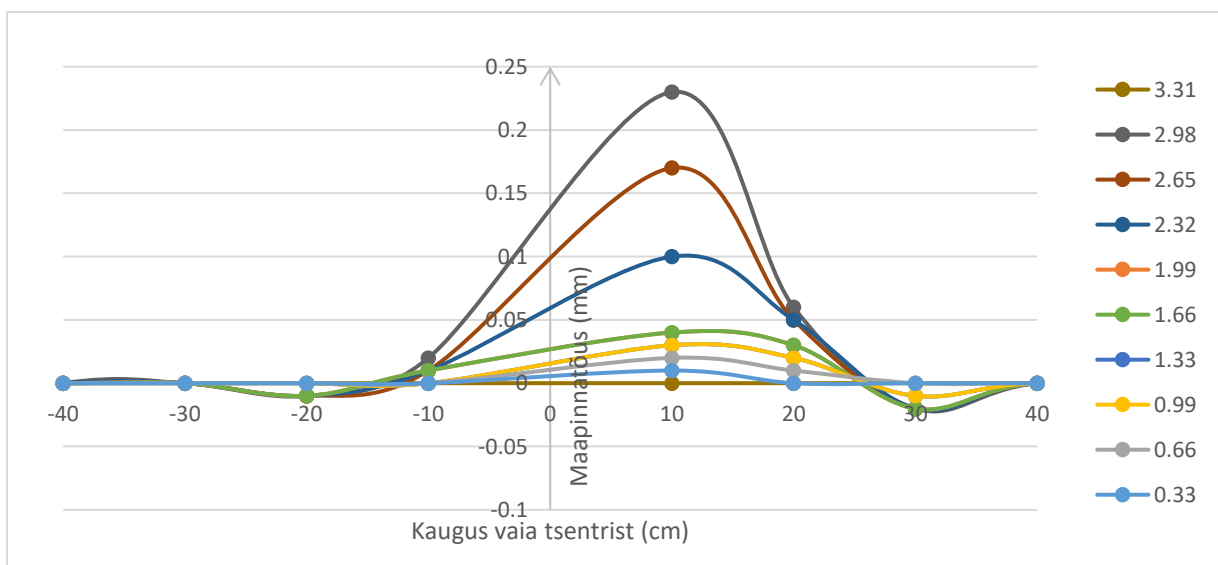
Katse seeria nr	Õlirõhk	Koormus aste	Aeg (min)	Nihkeanduri	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	0.68	0
1	1.7	0.33	1	0.68	0
			3	0.68	0
			7	0.68	0
			10	0.68	0
2	3.5	0.66	1	0.68	0
			3	0.68	0
			7	0.68	0
			10	0.68	0
3	5.2	0.99	1	0.84	0.16
			3	0.93	0.25
			7	0.96	0.28
			10	0.99	0.31
4	6.9	1.33	1	1.16	0.48
			3	1.28	0.6
			7	1.33	0.65
			10	1.41	0.73
5	8.7	1.66	1	2.34	1.66
			3	2.76	2.08
			7	2.99	2.31
			10	3.35	2.67
6	10.4	1.99	1	7.25	6.57
			3	7.76	7.08
			7	8.17	7.49
			10	8.38	7.7
7	12.1	2.32	1	13.03	12.35
			3	15.43	14.75
			7	16.00	15.32
			10	16.30	15.62
8	13.8	2.65	1	22.29	21.61
			3	23.91	23.23
			7	25.04	24.36
			10	25.48	24.8
9	15.6	2.98	1	30.89	30.21
			3	35.43	34.75
			7	36.60	35.92
			10	37.00	36.32



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

3. Maapinna tõusu uurimine

Koormusastme number	Koormus (kN)	Maapinna kaugus vaia tsentrist(cm)									
		-60	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40	60
		Maapinna tõus(mm)									
1	0,33	0	0	0	0	0	0,01	0	0	0	0
2	0,66	0	0	0	0	0	0,02	0,01	0	0	0
3	0,99	0	0	0	0	0	0,03	0,02	-0,01	0	0
4	1,33	0	0	0	0	0	0,03	0,02	-0,01	0	0
5	1,66	0,001	0	0	-0,01	0,01	0,04	0,03	-0,02	0	0
6	1,99	-0,003	0	0	-0,01	0,01	0,04	0,03	-0,02	0	0
7	2,32	-0,02	0	0	-0,01	0,01	0,1	0,05	-0,02	0	0
8	2,65	-0,02	0	0	-0,01	0,01	0,17	0,05	-0,02	0	0
9	2,98	-0,04	0	0	-0,01	0,02	0,23	0,06	-0,02	0	0,01
10	3,31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Joonis 3.1 Maapinna tõusu graafik.

Katsevai: KV 5 – kahe labaga vai, laba mõõt 50 mm

1. Väändekatse

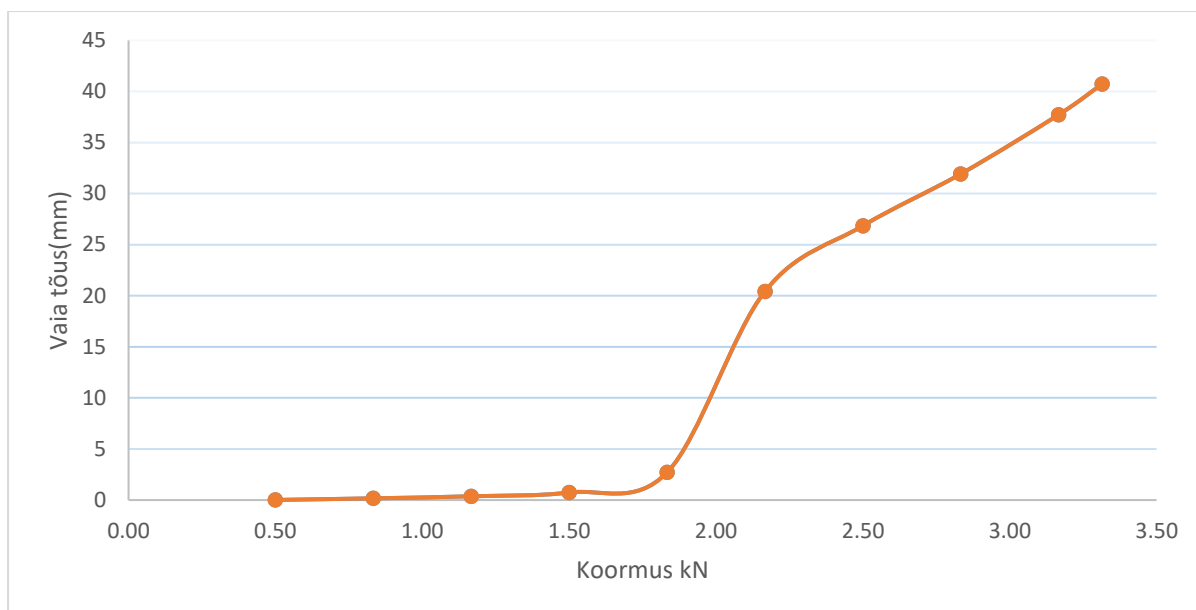
Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

Katse number	Väändevõtme näit Nm	Katsetulemus
1	140	Ei andnud tulemust

2. Staatileine koormuskatse tõmbele

Tabel 2.1 Staatilese tõmbekatse mõõtetulemused

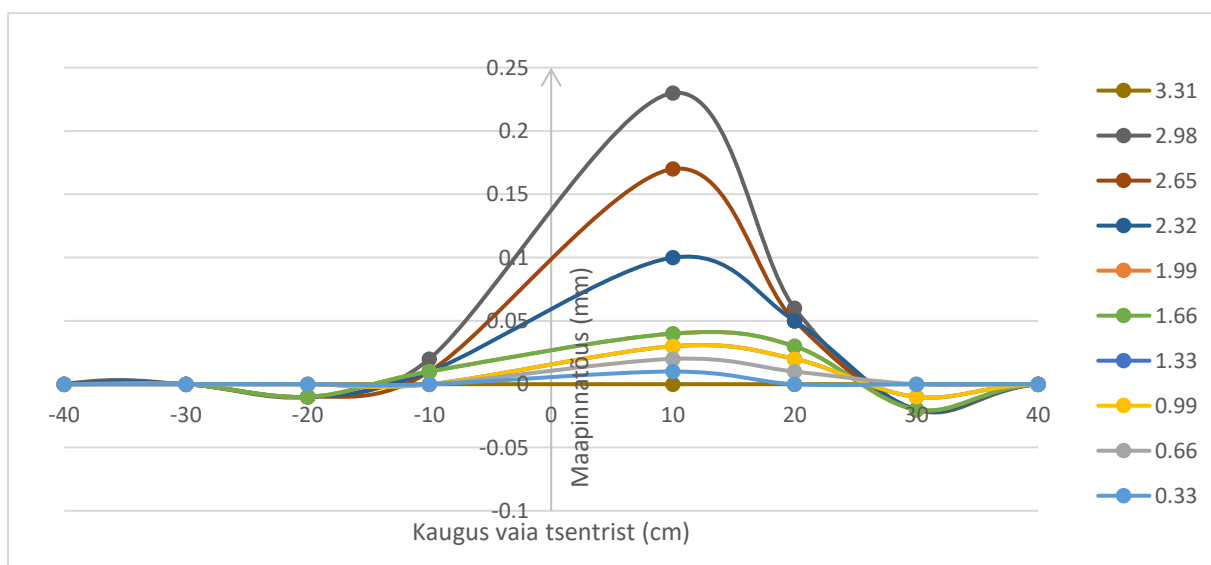
Katse seeria nr	Õlirõhk	Koormus aste	Aeg (min)	Nihkeanduri	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	0,45	0
1	1.7	0.33	1	0,45	0
			3	0,46	0,01
			7	0,46	0,01
			10	0,46	0,01
2	3.5	0.66	1	0,57	0,12
			3	0,58	0,13
			7	0,60	0,15
			10	0,62	0,17
3	5.2	0.99	1	0,80	0,35
			3	0,81	0,36
			7	0,82	0,37
			10	0,82	0,37
4	6.9	1.33	1	1,11	0,66
			3	1,14	0,69
			7	1,17	0,72
			10	1,19	0,74
5	8.7	1.66	1	2,63	2,18
			3	2,86	2,41
			7	3,09	2,64
			10	3,15	2,7
6	10.4	1.99	1	9,64	9,19
			3	20,49	20,04
			7	20,82	20,37
			10	20,88	20,43
7	12.1	2.32	1	26,28	25,83
			3	26,79	26,34
			7	27,17	26,72
			10	27,30	26,85
8	13.8	2.65	1	30,10	29,65
			3	31,76	31,31
			7	32,20	31,75
			10	32,38	31,93
9	15.6	2.98	1	34,74	34,29
			3	37,18	36,73
			7	37,94	37,49
			10	38,18	37,73
10	17.3	3.31	1	39,44	38,99
			3	40,24	39,79
			7	40,92	40,47
			10	41,17	40,72



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

3. Maapinna tõusu uurimine

Koormusastme number	Koormus (kN)	Maapinna kaugus vaia tsentrist(cm)									
		-60	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40	60
		Maapinna tõus(mm)									
1	0,50	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01
2	0,83	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,02
3	1,17	-0,03	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,03
4	1,50	-0,04	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,05	0,00	0,00	-0,01	-0,03
5	1,83	-0,05	-0,02	0,00	-0,01	0,00	0,32	0,00	0,00	-0,01	-0,03
6	2,17	-0,06	-0,02	0,00	-0,01	0,00	1,08	0,00	0,00	-0,01	-0,03
7	2,50	-0,07	-0,02	0,00	-0,01	0,00	1,12	0,00	0,00	-0,01	-0,03
8	2,83	-0,07	-0,02	0,00	-0,01	0,00	1,12	0,01	0,00	-0,01	-0,04
9	3,17	-0,08	-0,02	0,00	-0,01	0,00	1,14	0,01	0,00	-0,01	-0,04
10	3,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,16	0,00	0,00	0,00	0,00



Joonis 3.1 Maapinna tõusu graafik.

Katsevai: KV 6 – ühe labaga vai, laba mõõt 100 mm**1. Väändekatse**

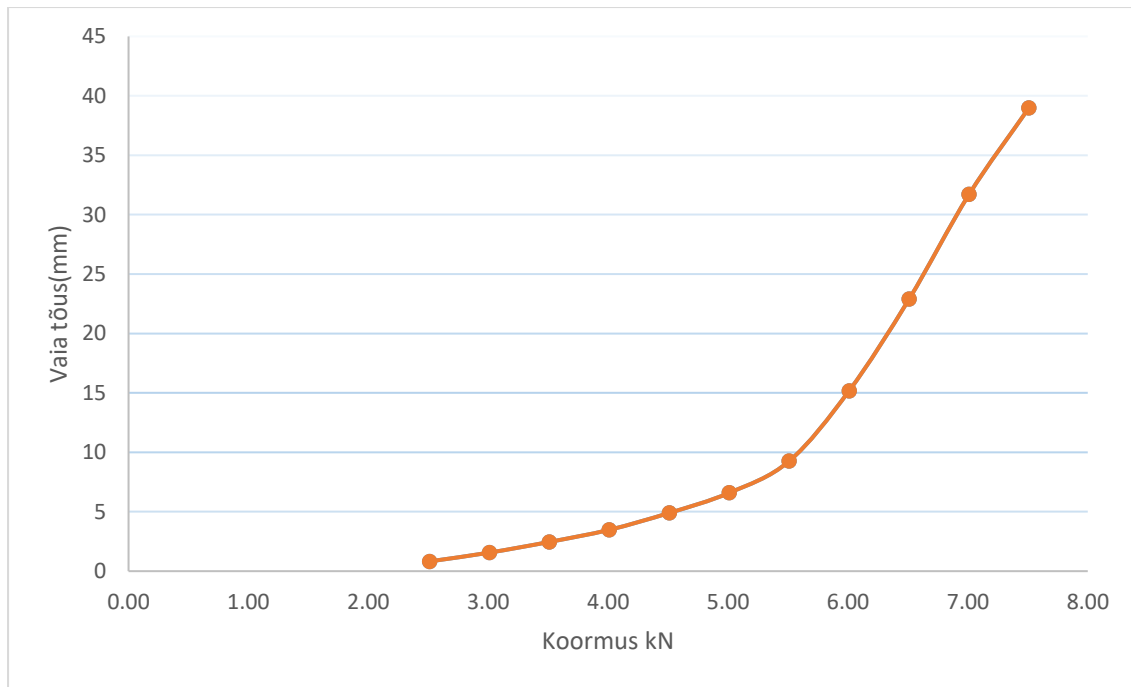
Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

Katse number	Väändevõtme näit Nm	Katsetulemus
1	140	Ei andnud tulemust

2. Staatileine koormuskatse tõmbele

Tabel 2.1 Staatilese tõmbekatse mõõtetulemused

Katse seeria nr	Õlirõhk	Koormus aste	Aeg (min)	Nihkeanduri	Siire (mm)
Algnäit	0,0	0,00	0	-0,79	0
1	13,1	2,51	1	-0,40	0,39
			3	0,10	0,89
			7	0,05	0,84
			10	0,03	0,82
2	15,7	3,01	1	0,34	1,13
			3	0,60	1,39
			7	0,69	1,48
			10	0,77	1,56
3	18,3	3,51	1	1,40	2,19
			3	1,56	2,35
			7	1,63	2,42
			10	1,67	2,46
4	20,9	4,01	1	2,11	2,9
			3	2,53	3,32
			7	2,66	3,45
			10	2,69	3,48
5	23,5	4,51	1	3,34	4,13
			3	3,79	4,58
			7	4,02	4,81
			10	4,11	4,9
6	26,2	5,01	1	5,01	5,8
			3	5,42	6,21
			7	5,71	6,5
			10	5,80	6,59
7	28,8	5,51	1	7,01	7,8
			3	7,76	8,55
			7	8,10	8,89
			10	8,47	9,26
8	31,4	6,01	1	12,01	12,8
			3	13,17	13,96
			7	14,00	14,79
			10	14,39	15,18
9	34,0	6,51	1	17,90	18,69
			3	19,64	20,43
			7	21,34	22,13
			10	22,10	22,89
10	36,6	7,01	1	24,8	25,59
			3	27,8	28,59
			7	29,89	30,68
			10	30,91	31,7
11	39,2	7,51	1	34,1	34,89
			3	36,5	37,29
			7	37,1	37,89
			10	38,2	38,99



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

Katsevai: KV 7 – kahe labaga vai, laba mõõt 100 mm**1. Väändekatse**

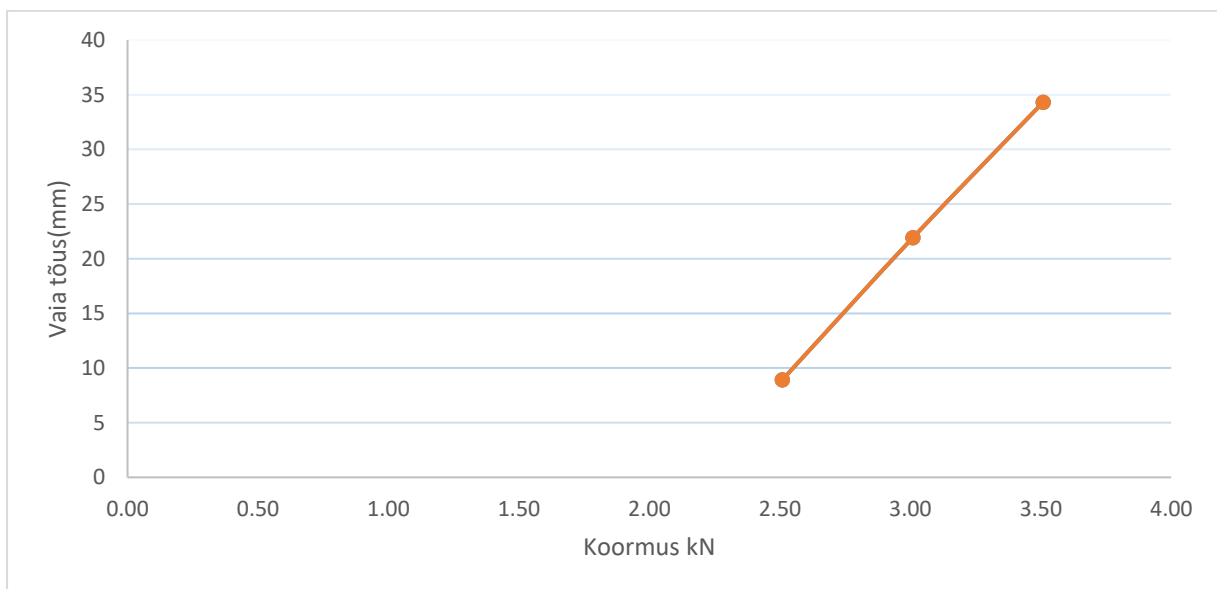
Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

Katse number	Väändevõtme näit Nm	Katsetulemus
1	140	Ei andnud tulemust

2. Staatileine koormuskatse tõmbele

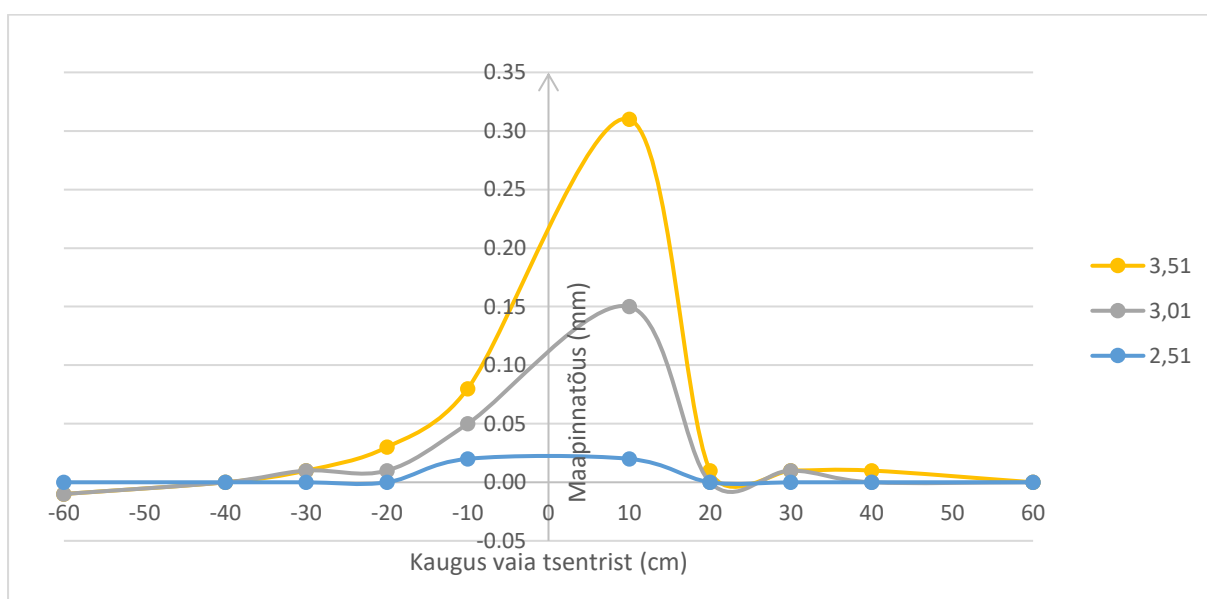
Tabel 2.1 Staatilese tõmbekatse mõõtetulemused

Katse seeria nr	Õlirõhk	Koormus aste	Aeg (min)	Nihkeanduri	Siire (mm)
	0,0	0,00	0	1,81	0
1	13,1	2,51	1	3,75	1,94
			3	7,89	6,08
			7	10,50	8,69
			10	10,73	8,92
2	15,7	3,01	1	13,12	11,31
			3	20,25	18,44
			7	23,53	21,72
			10	23,73	21,92
3	18,3	3,51	1	28,97	27,16
			3	34,22	32,41
			7	35,51	33,7
			10	36,13	34,32

**Joonis 2.1** Staatilese koormuskatse graafik

3. Maapinna tõusu uurimine

Koormusastme number	Koormus (kN)	Maapinna kaugus vaia tsentrist(cm)									
		-60	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40	60
		Maapinna tõus(mm)									
1	2,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
2	3,01	-0,01	0,00	0,01	0,01	0,05	0,15	0,00	0,01	0,00	0,00
3	3,51	-0,01	0,00	0,01	0,03	0,08	0,31	0,01	0,01	0,01	0,00
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

**Joonis 3.1** Maapinna tõusu graafik.

Katsevai: KV 8 – ühe labaga vai, laba mõõt 150 mm

1. Väändekatse

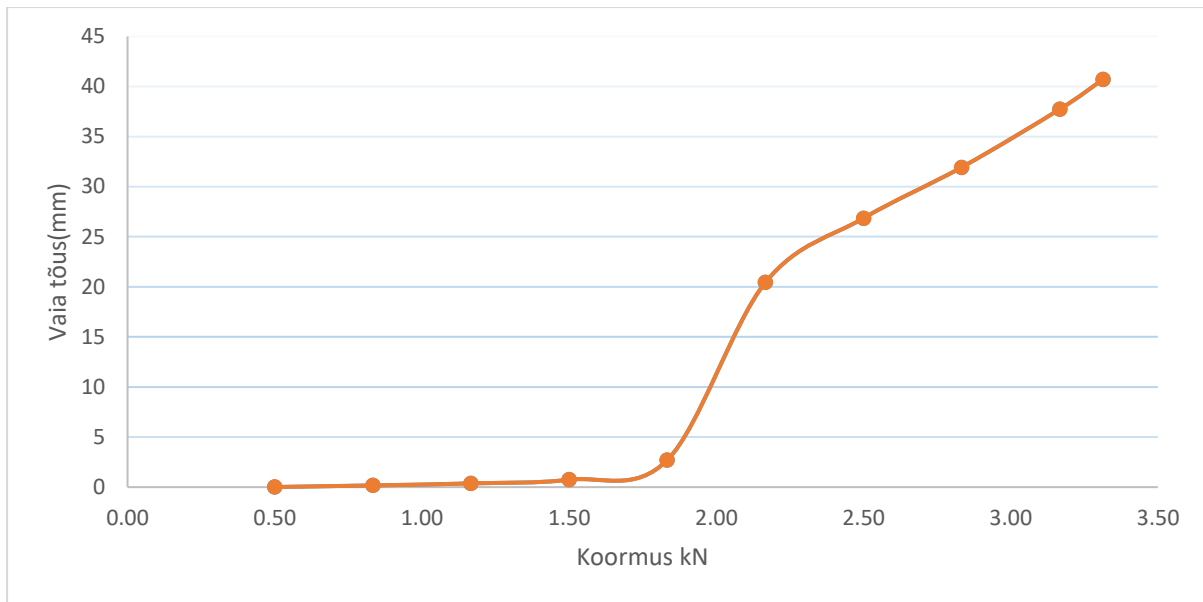
Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

Katse number	Väändevõtme näit Nm	Katsetulemus
1	140	Ei andnud tulemust

2. Staatileine koormuskatse tõmbele

Tabel 2.1 Staatilese tõmbekatse mõõtetulemused

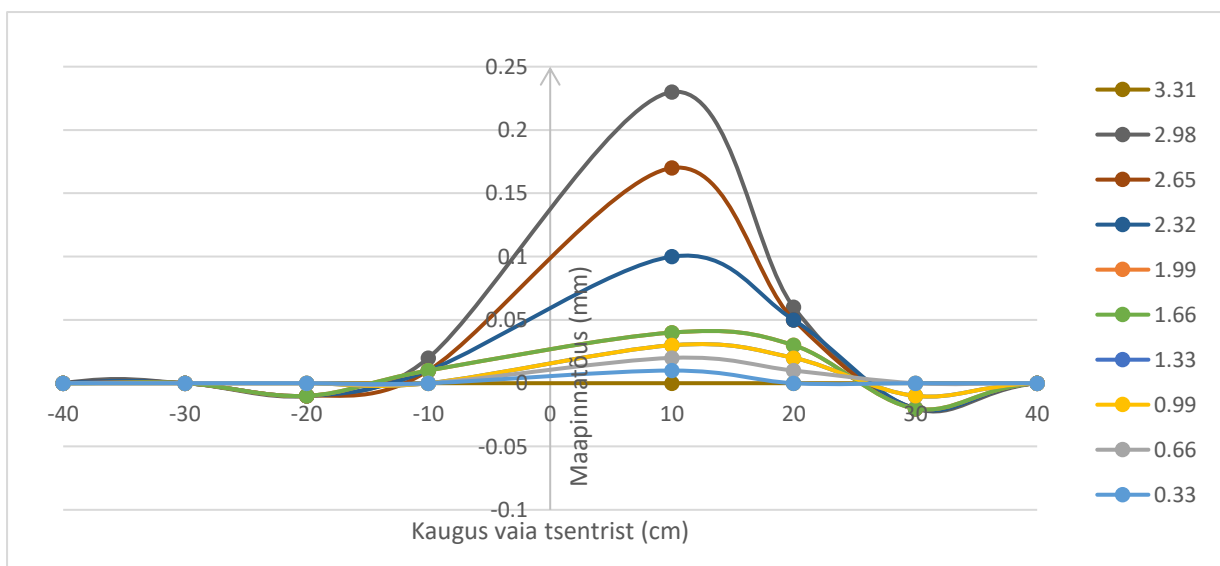
Katse seeria nr	Õlirõhk	Koormus aste	Aeg (min)	Nihkeanduri	Siire (mm)
	0,0	0,00	0	-0,79	0
1	13,1	2,51	1	-0,79	0
			3	-0,57	0,22
			7	-0,54	0,25
			10	-0,53	0,26
2	18,3	3,51	1	-0,04	0,75
			3	0,38	1,17
			7	0,50	1,29
			10	0,53	1,32
3	23,5	4,51	1	1,50	2,29
			3	1,72	2,51
			7	1,82	2,61
			10	1,86	2,65
4	28,8	5,51	1	2,89	3,68
			3	3,23	4,02
			7	3,39	4,18
			10	3,45	4,24
5	34,0	6,51	1	4,65	5,44
			3	5,16	5,95
			7	5,41	6,2
			10	5,50	6,29
6	39,2	7,51	1	6,99	7,78
			3	7,69	8,48
			7	8,10	8,89
			10	8,26	9,05
7	44,4	8,51	1	9,65	10,44
			3	11,48	12,27
			7	12,42	13,21
			10	12,71	13,5
8	49,6	9,51	1	14,21	15
			3	18,15	18,94
			7	19,86	20,65
			10	20,44	21,23
9	54,9	10,51	1	22,89	23,68
			3	28,04	28,83
			7	30,95	31,74
			10	31,81	32,6
10	57,2	10,96	1	33,45	34,24
			3	37,41	38,2
			7	40,64	41,43
			10	41,94	42,73



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

3. Maapinna tõusu uurimine

Koormusastme number	Koormus (kN)	Maapinna kaugus vaia tsentrist(cm)									
		-60	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40	60
		Maapinna tõus(mm)									
1	0,50	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01
2	0,83	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,02
3	1,17	-0,03	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,03
4	1,50	-0,04	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,05	0,00	0,00	-0,01	-0,03
5	1,83	-0,05	-0,02	0,00	-0,01	0,00	0,32	0,00	0,00	-0,01	-0,03
6	2,17	-0,06	-0,02	0,00	-0,01	0,00	1,08	0,00	0,00	-0,01	-0,03
7	2,50	-0,07	-0,02	0,00	-0,01	0,00	1,12	0,00	0,00	-0,01	-0,03
8	2,83	-0,07	-0,02	0,00	-0,01	0,00	1,12	0,01	0,00	-0,01	-0,04
9	3,17	-0,08	-0,02	0,00	-0,01	0,00	1,14	0,01	0,00	-0,01	-0,04
10	3,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,16	0,00	0,00	0,00	0,00



Joonis 3.1 Maapinna tõusu graafik.

Katsevai: KV 9 – kahe labaga vai, laba mõõt 150 mm**1. Väändekatse**

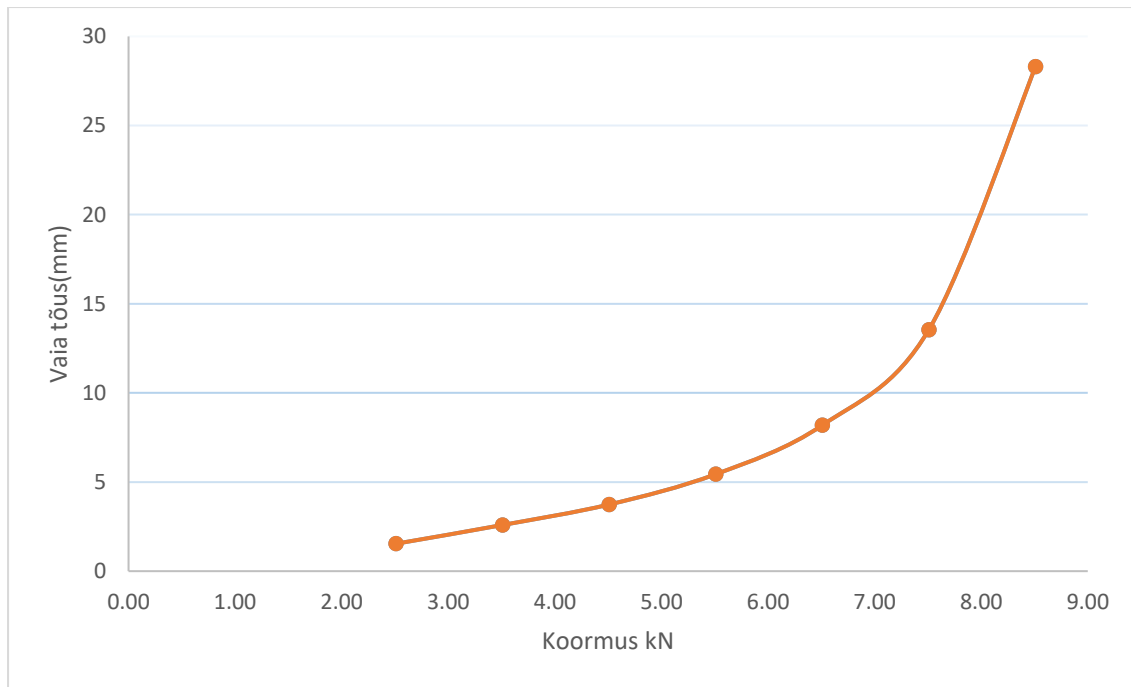
Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

Katse number	Väändevõtme näit Nm	Katsetulemus
1	140	Ei andnud tulemust

2. Staatileine koormuskatse tõmbele

Tabel 2.1 Staatilese tõmbekatse mõõtetulemused

Katse seeria nr	Õlirõhk	Koormus aste	Aeg (min)	Nihkeanduri	Siire (mm)
Algnäit	0,0	0,00	0	2,84	0
1	13,1	2,51	1	4,00	1,16
			3	4,29	1,45
			7	4,37	1,53
			10	4,38	1,54
2	18,3	3,51	1	5,24	2,4
			3	5,32	2,48
			7	5,40	2,56
			10	5,43	2,59
3	23,5	4,51	1	6,21	3,37
			3	6,46	3,62
			7	6,54	3,7
			10	6,58	3,74
4	28,8	5,51	1	7,64	4,8
			3	8,04	5,2
			7	8,22	5,38
			10	8,28	5,44
5	34,0	6,51	1	9,89	7,05
			3	10,56	7,72
			7	10,90	8,06
			10	11,03	8,19
6	39,2	7,51	1	12,51	9,67
			3	15,02	12,18
			7	16,10	13,26
			10	16,39	13,55
7	44,4	8,51	1	18,50	15,66
			3	24,12	21,28
			7	29,81	26,97
			10	31,14	28,3



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

Katsevai: KV 1 – Sile toruvai 26,9x2,55 mm**1. Dünaamiline koormustest**

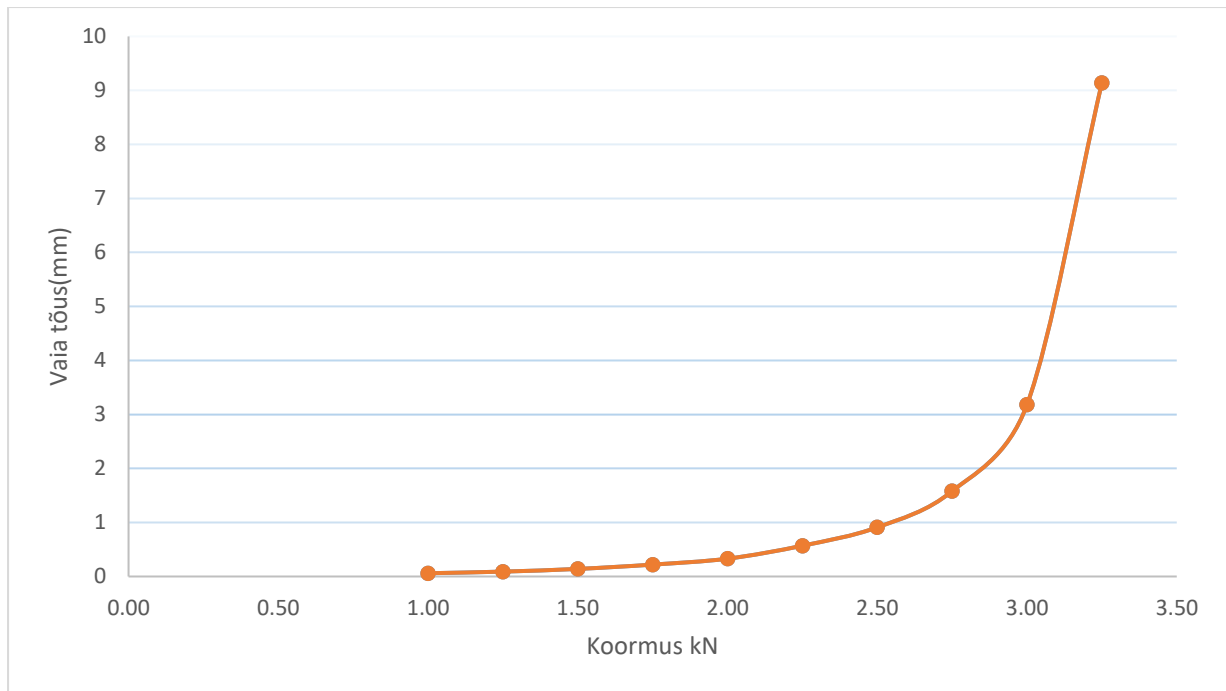
Tabel 1,1 Dünaamilise koormustesti mõõtmised

Katse number	Vaia sügavus(mm)	Vajum kolme löögi peale (mm)
1	675	42
2	750	30
3	845	25
4	905	20

2. Staatiline koormuskatse tõmbele

Tabel 2,1 Staatilise tõmbekatse mõõtetulemused

Katse seeria nr	Õlirõhk süsteemis bar	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
Algnäit	0,0	0,00	0	1,95	0
1	5,2	1,00	1	1,96	0,01
			3	2,01	0,06
			5	2,01	0,06
2	6,5	1,25	1	2,02	0,07
			3	2,04	0,09
			5	2,04	0,09
3	7,8	1,50	1	2,07	0,12
			3	2,08	0,13
			5	2,09	0,14
4	9,1	1,75	1	2,15	0,2
			3	2,17	0,22
			5	2,17	0,22
5	10,4	2,00	1	2,27	0,32
			3	2,28	0,33
			5	2,28	0,33
6	11,7	2,25	1	2,46	0,51
			3	2,52	0,57
			5	2,52	0,57
7	13,1	2,50	1	2,76	0,81
			3	2,85	0,9
			5	2,86	0,91
8	14,4	2,75	1	3,23	1,28
			3	3,34	1,39
			7	3,51	1,56
			10	3,53	1,58
9	15,7	3,00	1	4,29	2,34
			3	4,85	2,9
			7	4,94	2,99
			10	5,13	3,18



Joonis 2,1 Staatilise koormuskatse graafik

Katsevai: KV 2 – Sile vai 25mm**1. Dünaamiline koormustest**

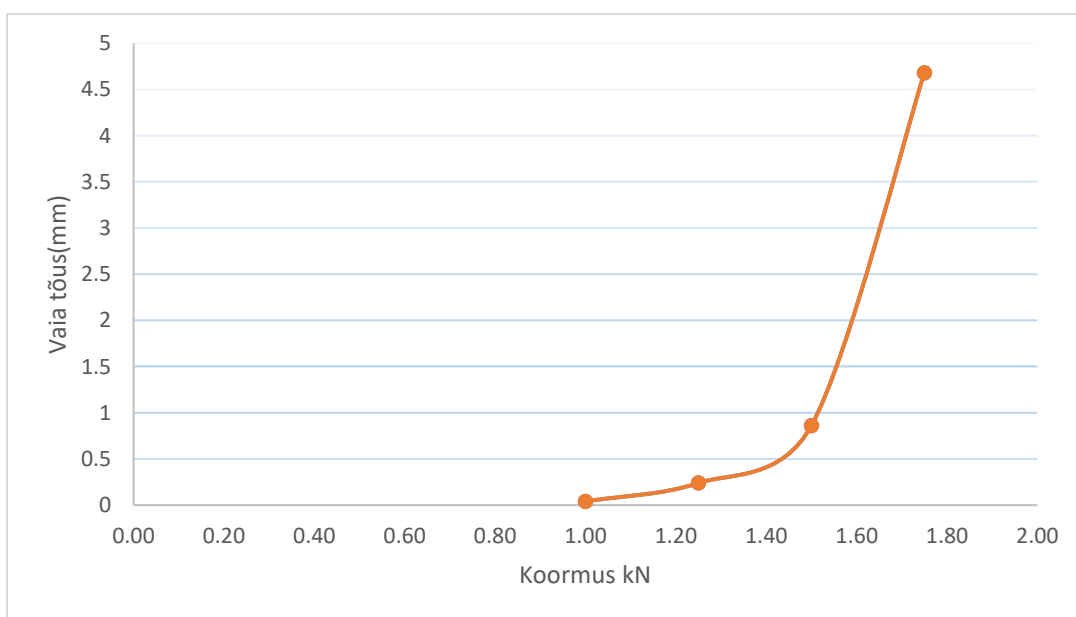
Tabel 1.1 Dünaamilise koormustesti mõõtmised

Katse number	Vaia sügavus pinnases(mm)	Vajum kolme löögi peale (mm)
1	730	35
2	755	30
3	950	30
4	965	25

2. Staatileine koormuskatse tõmbele

Tabel 2.1 Staatileise tõmbekatse mõõtetulemused

Katse seeria nr	Õlirõhk süsteemis bar	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	3.03	0
1	5.2	1.00	1	3.04	0.01
			3	3.06	0.03
			5	3.07	0.04
2	6.5	1.25	1	3.24	0.21
			3	3.25	0.22
			5	3.27	0.24
3	7.8	1.50	1	3.50	0.47
			3	3.75	0.72
			7	3.84	0.81
			10	3.89	0.86
4	9.1	1.75	1	5.63	2.6
			3	7.01	3.98
			7	7.51	4.48
			10	7.71	4.68

**Joonis 2.1** Staatileise koormuskatse graafik

Katsevai: KV 3 – Vai 25mm**1. Dünaamiline koormustest**

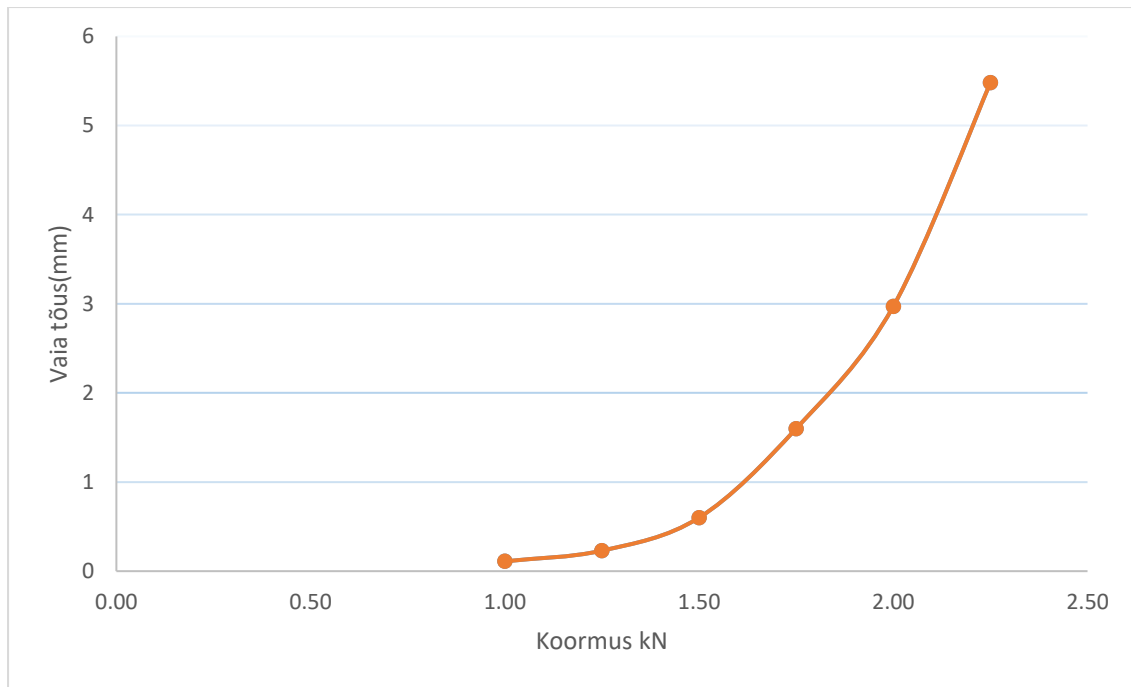
Tabel 1.1 Dünaamilise koormustesti mõõtmised

Katse number	Vaia sügavus pinnases(mm)	Vajum kolme löögi peale(mm)
1	665	45
2	705	35
3	785	25
4	815	20
5	925	24

2. Staatiline koormuskatse tõmbele

Tabel 2.1 Staatilise tõmbekatse mõõtetulemused

Katse seeria nr	Õlirõhk süsteemis bar	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	2.55	0
1	5.2	1.00	1	2.66	0.11
			3	2.66	0.11
			7	2.66	0.11
			10		
2	6.5	1.25	1	2.75	0.2
			3	2.77	0.22
			7	2.78	0.23
			10		
3	7.8	1.50	1	3.04	0.49
			3	3.12	0.57
			7	3.15	0.6
			10		
4	9.1	1.75	1	4.00	1.45
			3	4.11	1.56
			7	4.15	1.6
			10		
5	10.4	2.00	1	4.99	2.44
			3	5.35	2.8
			7	5.46	2.91
			10	5.52	2.97
6	11.7	2.25	1	7.06	4.51
			3	7.55	5
			7	7.98	5.43
			10	8.03	5.48

**Joonis 2.1** Staatilise koormuskatse graafik

Katsevai: KV 4 – ühe labaga vai, laba mõõt 50 mm**1. Väändekatse**

Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

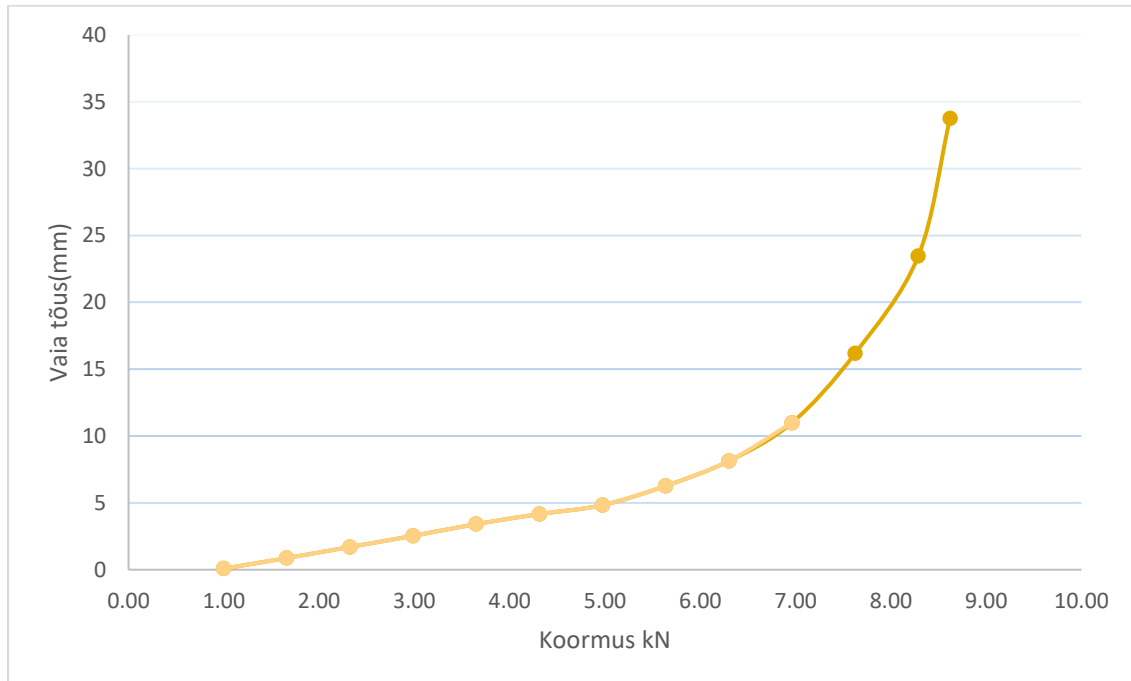
Katse number	Väändevõtme näit Nm	Katsetulemus
1	140	Ei andnud tulemust

2. Staatileine koormuskatse tõmbele

Tabel 2.1 Staatilese tõmbekatse mõõtetulemused

Katse seeria nr	Õlirõhk süsteemis bar	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	0.00	0
1	1.7	0.33	1	0.07	0.07
			3	0.08	0.08
			5	0.08	0.08
2	3.5	0.66	1	0.78	0.78
			3	0.82	0.82
			5	0.87	0.87
3	5.2	0.99	1	1.59	1.59
			3	1.68	1.68
			5	1.70	1.7
4	6.9	1.33	1	2.40	2.4
			3	2.49	2.49
			5	2.53	2.53
5	8.7	1.66	1	3.26	3.26
			3	3.37	3.37
			5	3.41	3.41
					0
6	10.4	1.99	1	3.95	3.95
			3	4.04	4.04
			5	4.16	4.16
7	12.1	2.32	1	4.77	4.77
			3	4.83	4.83
			5	4.83	4.83
8	13.8	2.65	1	5.66	5.66
			3	5.98	5.98
			7	6.15	6.15
			10	6.27	6.27
9	15.6	2.98	1	7.21	7.21
			3	7.57	7.57
			7	7.97	7.97
			10	8.13	8.13
10	36.3	6.96	1	9.27	9.27
			3	9.99	9.99
			7	10.58	10.58
			10	10.99	10.99

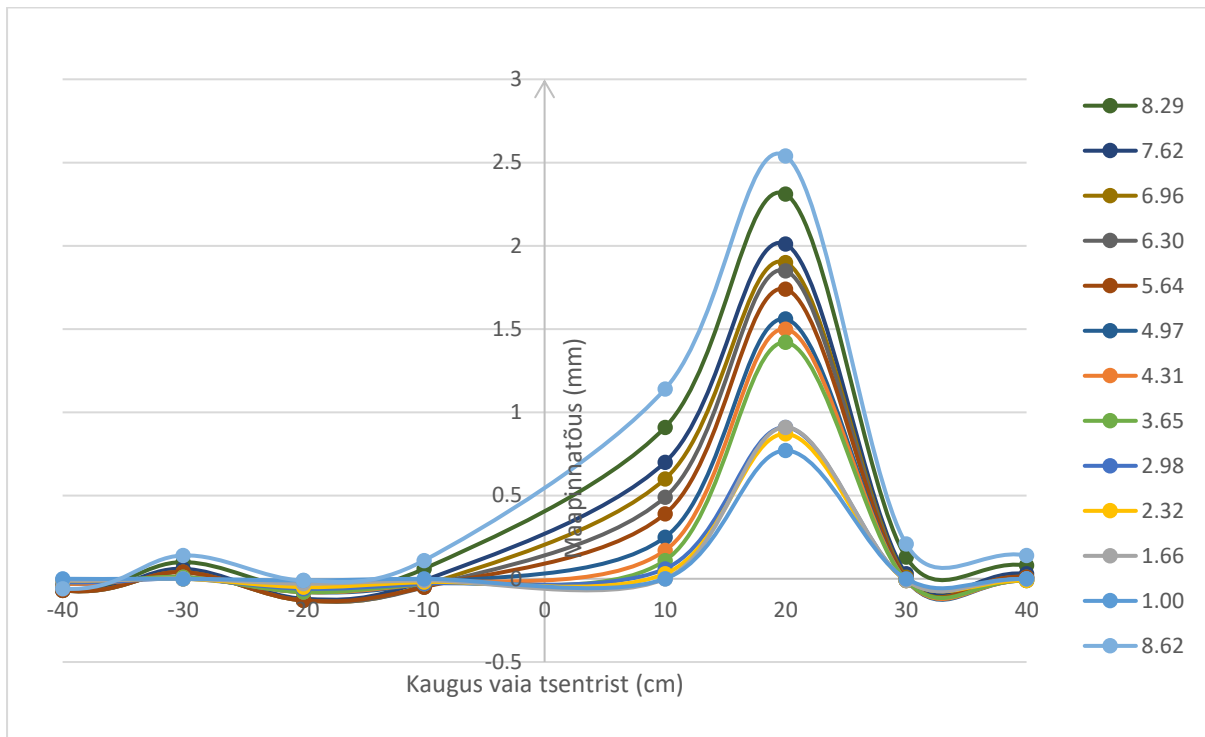
11	39.8	7.62	1	12.47	12.47
			3	14.13	14.13
			7	15.66	15.66
			10	16.18	16.18
12	43.3	8.29	1	18.58	18.58
			3	20.6	20.6
			7	22.63	22.63
			10	23.45	23.45
13	45.0	8.62	1	26.77	26.77
			3	29.09	29.09
			7	32.3	32.3
			10	33.76	33.76



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

3. Maapinna tõusu uurimine

Koormusastme number	Koormus (kN)	Maapinna kaugus vaia tsentrist(cm)									
		-60	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40	60
		Maapinna tõus(mm)									
1	1.00	0.018	0	0	-0.01	0	0	0.77	0	0	0
2	1.66	0.031	-0.01	0	-0.03	-0.01	0	0.91	-0.01	0	0
3	2.32	0.041	-0.01	0	-0.05	-0.02	0.03	0.87	-0.01	-0.01	0
4	2.98	0.055	-0.02	0	-0.06	-0.03	0.06	0.91	-0.01	0	0
5	3.65	0.055	-0.02	0.01	-0.08	-0.03	0.11	1.42	-0.01	-0.01	-0.01
6	4.31	0.059	-0.03	0.01	-0.08	-0.03	0.17	1.5	-0.01	-0.01	-0.01
7	4.97	0.062	-0.03	0.01	-0.08	-0.03	0.25	1.56	-0.01	-0.01	-0.01
8	5.64	0.244	-0.07	0.04	-0.13	-0.05	0.39	1.74	0	0.01	-0.19
9	6.30	0.255	-0.07	0.04	-0.13	-0.05	0.49	1.85	0	0.01	-0.2
10	6.96	0.26	-0.07	0.04	-0.13	-0.04	0.6	1.9	0.01	0.01	-0.2
11	7.62	0.26	-0.07	0.06	-0.12	-0.01	0.7	2.01	0.03	0.03	-0.2
12	8.29	0.27	-0.06	0.1	-0.06	0.06	0.91	2.31	0.13	0.08	-0.2
13	8.62	0.27	-0.06	0.14	-0.01	0.11	1.14	2.54	0.21	0.14	-0.2

**Joonis 3.1** Maapinna tõusu graafik.

Katsevai: KV 5 – kahe labaga vai, laba mõõt 50 mm

1. Väändekatse

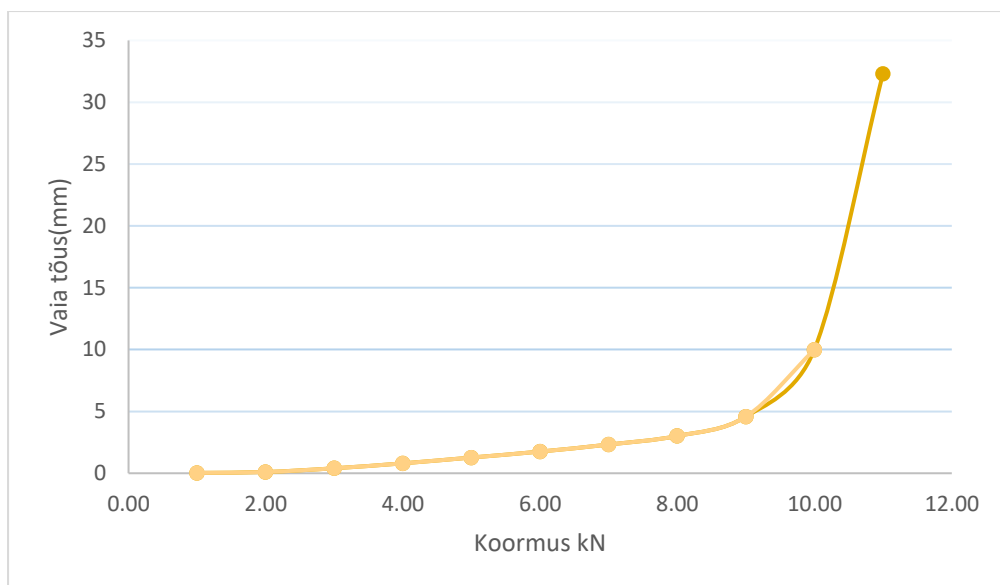
Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

Katse number	Väändevõtme näit Nm	Katsetulemus
1	140	Ei andnud tulemust

2. Staatileine koormuskatse tõmbele

Tabel 2.1 Staatilese tõmbekatse mõõtetulemused

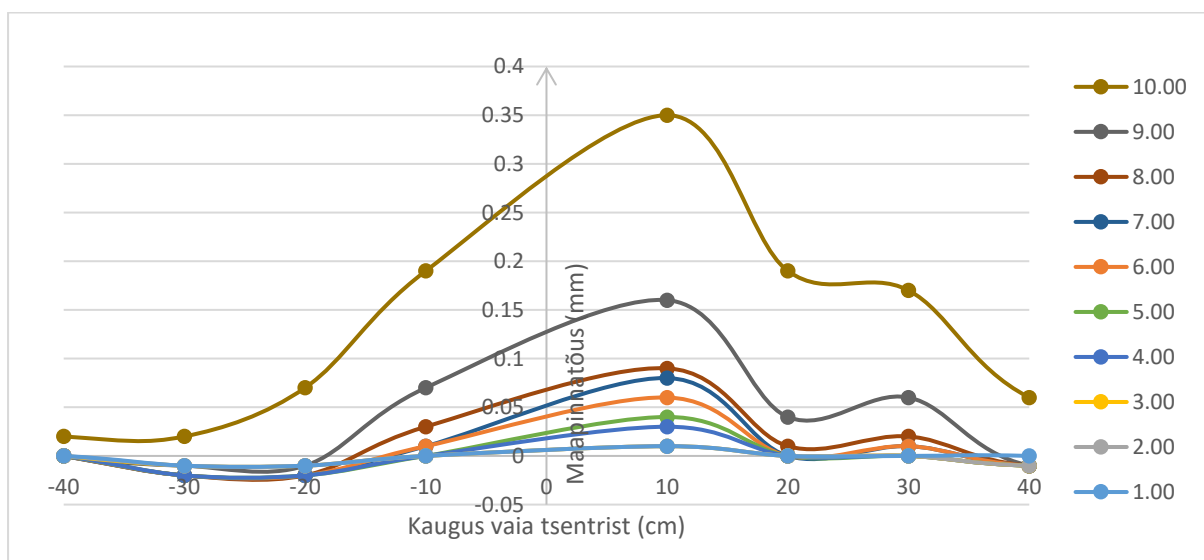
Katse seeria nr	Õlirõhk	Koormus aste	Aeg (min)	Nihkeanduri	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	2.16	0
1	5.2	1.00	1	2.19	0.03
			3	2.19	0.03
			5	2.19	0.03
2	10.4	2.00	1	2.25	0.09
			3	2.26	0.1
			5	2.26	0.1
3	15.6	3.00	1	2.50	0.34
			3	2.54	0.38
			5	2.56	0.4
4	20.9	4.00	1	2.92	0.76
			3	2.94	0.78
			5	2.96	0.8
5	26.1	5.00	1	3.37	1.21
			3	3.40	1.24
			5	3.43	1.27
6	31.3	6.00	1	3.84	1.68
			3	3.87	1.71
			5	3.91	1.75
7	36.5	7.00	1	4.38	2.22
			3	4.43	2.27
			5	4.48	2.32
8	41.7	8.00	1	4.89	2.73
			3	5.12	2.96
			5	5.17	3.01
9	47.0	9.00	1	5.93	3.77
			3	6.26	4.1
			7	6.60	4.44
			10	6.73	4.57
10	52.2	10.00	1	8.1	5.94
			3	9.94	7.78
			7	11.13	8.97
			10	12.15	9.99
11	57.4	11.00	1	14.57	12.41
			3	20.91	18.75
			7	30.15	27.99
			10	34.47	32.31



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

3. Maapinna tõusu uurimine

Koormusastme number	Koormus (kN)	Maapinna kaugus vaia tsentrist(cm)									
		-60	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40	60
		Maapinna tõus(mm)									
1	1.00	0.01	0	-0.01	-0.01	0	0.01	0	0	0	-0.01
2	2.00	0.017	0	-0.01	-0.01	0	0.01	0	0	-0.01	-0.01
3	3.00	0.026	0	-0.01	-0.01	0	0.01	0	0	-0.01	-0.01
4	4.00	0.033	0	-0.02	-0.02	0	0.03	0	0	-0.01	-0.01
5	5.00	0.036	0	-0.02	-0.02	0	0.04	0	0	-0.01	-0.01
6	6.00	0.04	0	-0.02	-0.02	0.01	0.06	0	0.01	-0.01	-0.01
7	7.00	0.044	0	-0.02	-0.02	0.01	0.08	0	0.01	-0.01	-0.01
8	8.00	0.045	0	-0.02	-0.02	0.03	0.09	0.01	0.02	-0.01	-0.01
9	9.00	0.045	0	-0.01	-0.01	0.07	0.16	0.04	0.06	-0.01	-0.02
10	10.00	0.045	0.02	0.02	0.07	0.19	0.35	0.19	0.17	0.06	-0.02
11	11.00	0.043	0.18	0.34	0.56	0.86	1.23	0.92	0.67	0.38	0.09



Joonis 3.1 Maapinna tõusu graafik.

Katsevai: KV 6 – ühe labaga vai, laba mõõt 100 mm

1. Väändekatse

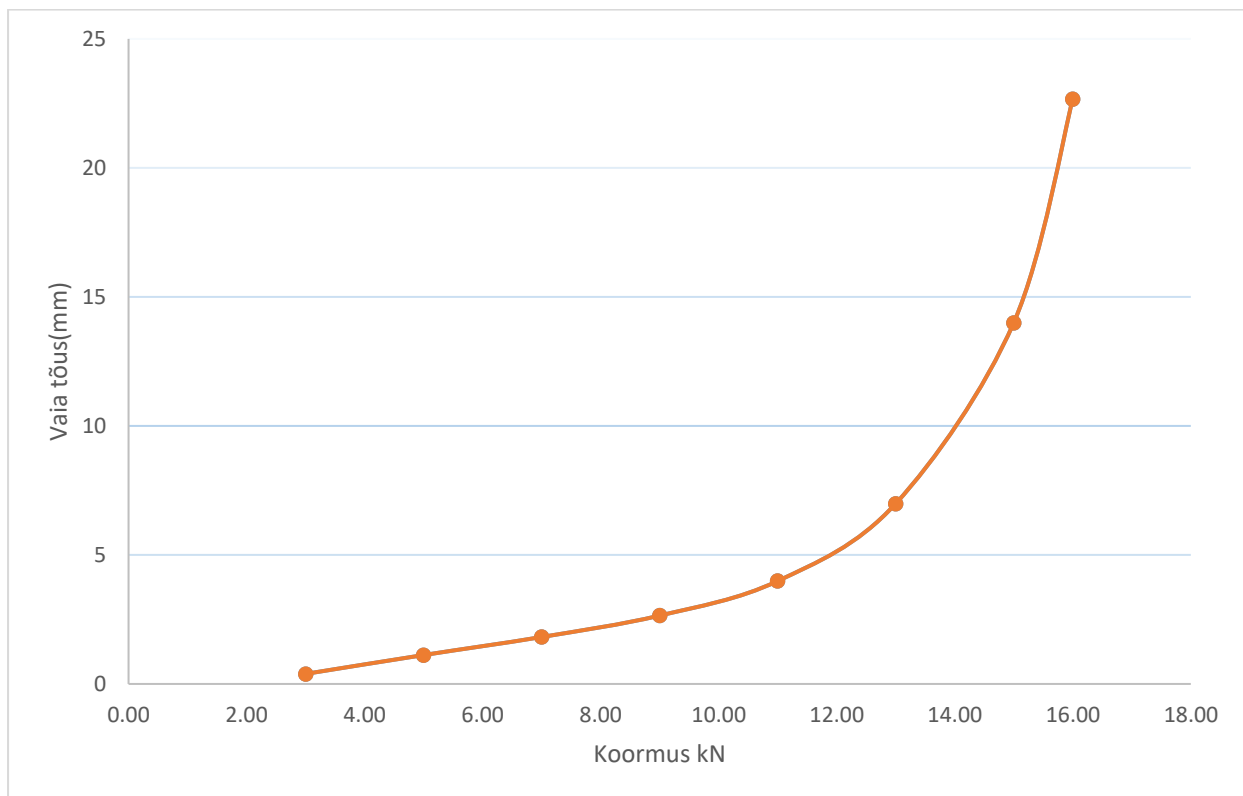
Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

Katse number	Väändevõtme näit Nm	Katsetulemus
1	140	Koormust tõsta
2	260	Positiivne tulemus
3	270	Ei andnud tulemust

2. Staatileine koormuskatse tõmbele

Tabel 2.1 Staatilese tõmbekatse mõõtetulemused

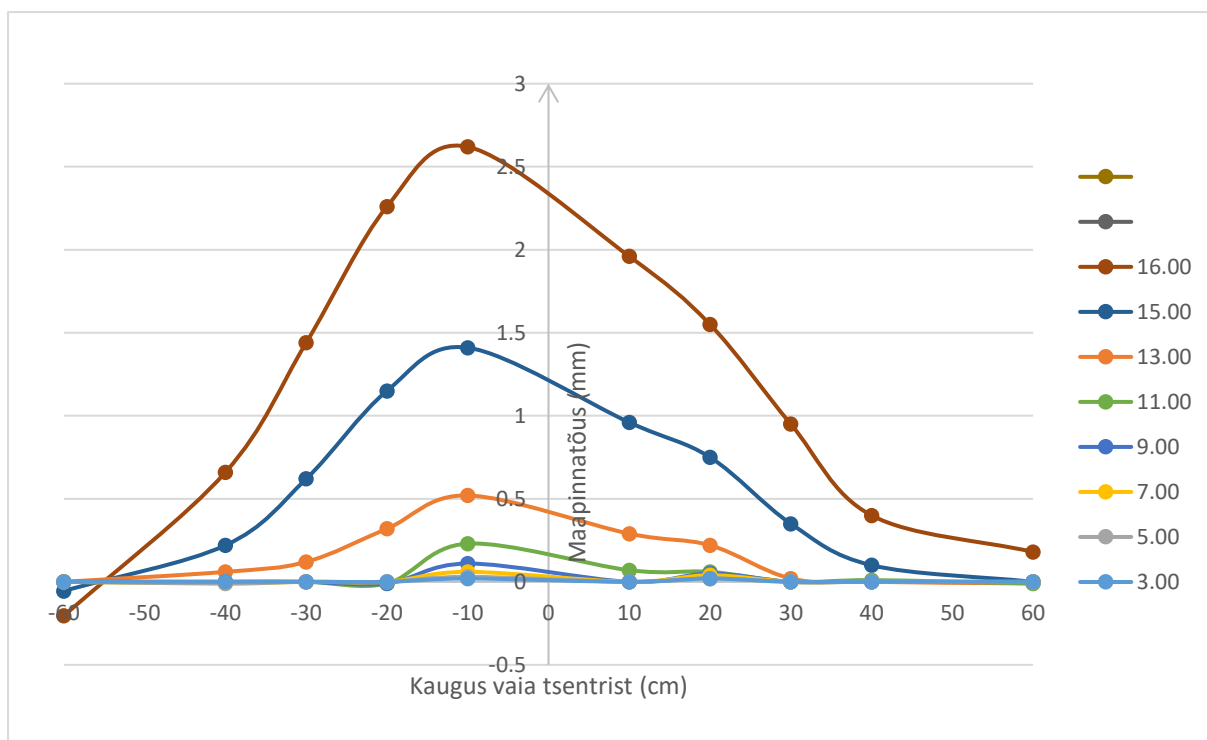
Katse seeria nr	Õlirõhk süsteemis bar	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	2.53	0
1	15.7	3.00	1	2.87	0.34
			3	2.92	0.39
			5	2.92	0.39
2	26.1	5.00	1	3.53	1.00
			3	3.63	1.10
			5	3.65	1.12
3	36.5	7.00	1	4.27	1.74
			3	4.33	1.80
			5	4.35	1.82
4	47.0	9.00	1	4.97	2.44
			3	5.15	2.62
			5	5.18	2.65
5	57.4	11.00	1	6.09	3.56
			3	6.30	3.77
			7	6.46	3.93
			10	6.52	3.99
6	67.9	13.00	1	7.79	5.26
			3	8.79	6.26
			7	9.34	6.81
			10	9.52	6.99
7	78.3	15.00	1	10.63	8.10
			3	13.86	11.33
			7	15.91	13.38
			10	16.53	14.00
8	83.5	16.00	1	18.58	16.05
			3	23.77	21.24
			7	24.15	21.62
			10	25.20	22.67



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

3. Maapinna tõusu uurimine

Koormusastme number	Koormus (kN)	Maapinna kaugus vaia tsentrist(cm)										
		-60	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40	60	
		Maapinna tõus(mm)										
1	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	
2	5.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	
3	7.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.06	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	
4	9.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.11	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	
5	11.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.23	0.07	0.06	0.00	0.01	-0.01	
6	13.00	0.00	0.06	0.12	0.32	0.52	0.29	0.22	0.02	0.00	-0.01	
7	15.00	-0.05	0.22	0.62	1.15	1.41	0.96	0.75	0.35	0.10	0.00	
8	16.00	-0.21	0.66	1.44	2.26	2.62	1.96	1.55	0.95	0.40	0.18	

**Joonis 3.1** Maapinna tõusu graafik.

Katsevai: KV 7 – kahe labaga vai, laba mõõt 100 mm**1. Väändekatse**

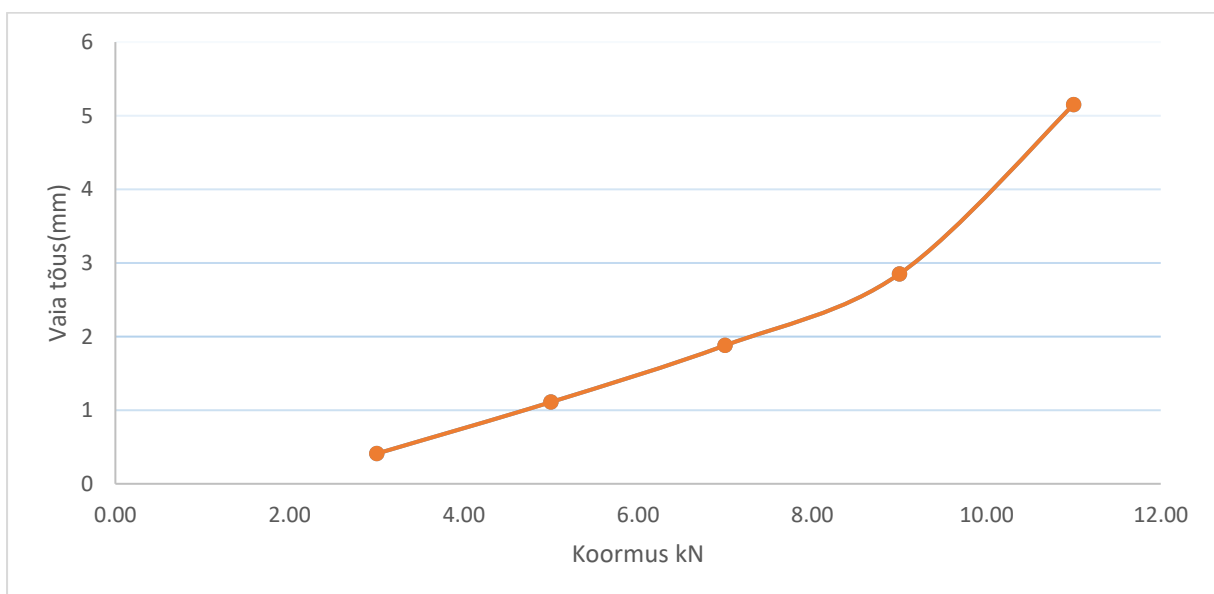
Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

Katse number	Väändevõtme näit Nm	Katsetulemus
1	220	Koormust tõsta
2	230	Positiivne tulemus
3	240	Ei andnud tulemust

2. Staatileine koormuskatse tõmbele

Tabel 2.1 Staatilese tõmbekatse mõõtetulemused

Katse seeria nr	Õlirõhk süsteemis bar	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	2.04	0
1	15.7	3.00	1	2.35	0.31
			3	2.43	0.39
			5	2.45	0.41
2	26.1	5.00	1	2.96	0.92
			3	3.14	1.1
			5	3.15	1.11
3	36.5	7.00	1	3.57	1.53
			3	3.89	1.85
			5	3.92	1.88
4	47.0	9.00	1	4.46	2.42
			3	4.84	2.8
			5	4.89	2.85
5	57.4	11.00	1	5.61	3.57
			3	6.61	4.57
			7	7.03	4.99
			10	7.19	5.15

**Joonis 2.1** Staatilese koormuskatse graafik

Katsevai: KV 8 – ühe labaga vai, laba mõõt 150 mm**1. Väändekatse**

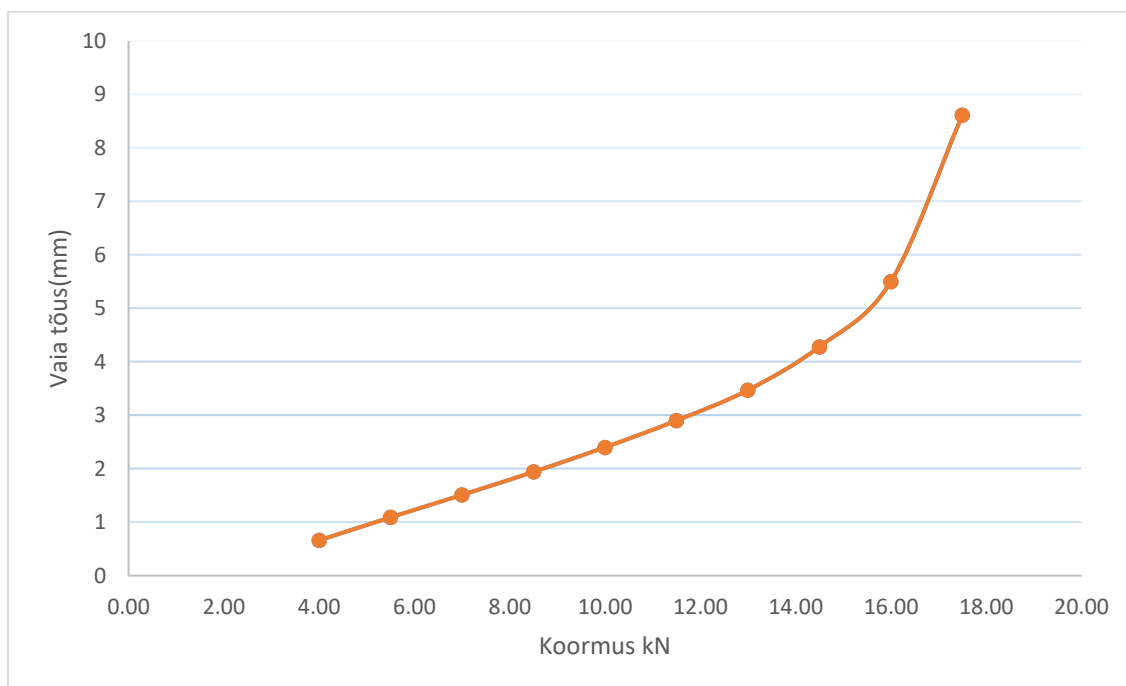
Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

Katse number	Väändevõtme näit Nm	Katsetulemus
1	460	Koormust tõsta
2	480	Positiivne tulemus
3	490	Ei andnud tulemust

2. Staatileine koormuskatse tõmbele

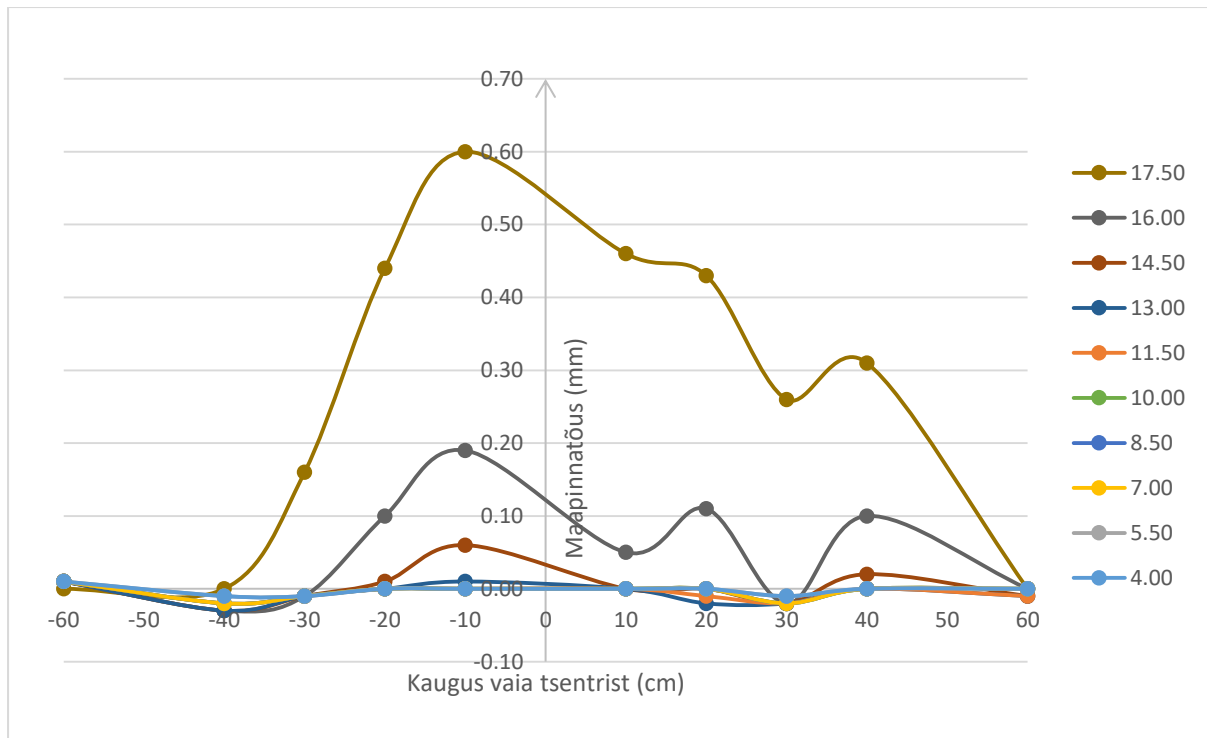
Tabel 2.1 Staatilese tõmbekatse mõõtetulemused

Katse seeria nr	Õlirõhk süsteemis bar	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	1.31	0
1	20.9	4.00	1	1.61	0.3
			3	1.95	0.64
			5	1.97	0.66
2	28.7	5.50	1	2.37	1.06
			3	2.38	1.07
			5	2.40	1.09
3	36.5	7.00	1	2.78	1.47
			3	2.80	1.49
			5	2.82	1.51
4	44.4	8.50	1	3.22	1.91
			3	3.24	1.93
			5	3.25	1.94
5	52.2	10.00	1	3.67	2.36
			3	3.70	2.39
			5	3.71	2.4
6	60.0	11.50	1	4.09	2.78
			3	4.17	2.86
			5	4.21	2.9
7	67.9	13.00	1	4.70	3.39
			3	4.76	3.45
			5	4.78	3.47
8	75.7	14.50	1	5.40	4.09
			3	5.55	4.24
			5	5.59	4.28
9	83.5	16.00	1	6.44	5.13
			3	6.63	5.32
			5	6.81	5.5
10	91.4	17.50	1	7.90	6.59
			3	8.92	7.61
			7	9.67	8.36
			10	9.92	8.61



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

Koormusastme number	Koormus (kN)	Maapinna kaugus vaia tsentrist(cm)									
		-60	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40	60
		Maapinna tõus(mm)									
1	4.00	0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
2	5.50	0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
3	7.00	0.01	-0.02	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.00
4	8.50	0.01	-0.02	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.00
5	10.00	0.01	-0.02	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.00
6	11.50	0.01	-0.02	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.02	0.00	-0.01
7	13.00	0.01	-0.03	-0.01	0.00	0.01	0.00	-0.02	-0.02	0.00	-0.01
8	14.50	0.01	-0.03	-0.01	0.01	0.06	0.00	0.00	-0.02	0.02	-0.01
9	16.00	0.01	-0.03	-0.01	0.10	0.19	0.05	0.11	-0.02	0.10	0.00
10	17.50	0.00	0.00	0.16	0.44	0.60	0.46	0.43	0.26	0.31	0.00



Joonis 3.1 Maapinna tõusu graafik.

Katsevai: KV 9 – kahe labaga vai, laba mõõt 150 mm**1. Väändekatse**

Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

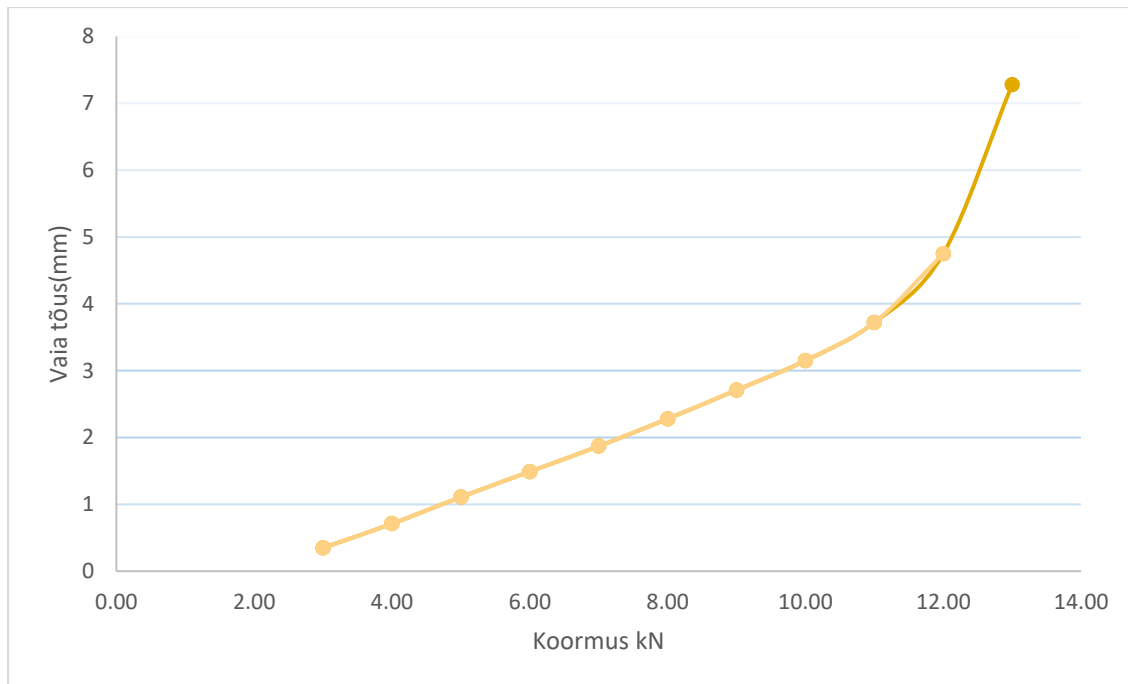
Katse number	Väändevõtme näit Nm	Katsetulemus
1	400	Koormust tõsta
2	420	Positiivne tulemus
3	430	Ei andnud tulemust

2. Staatiline koormuskatse tõmbele

Tabel 2.1 Staatilise tõmbekatse mõõtetulemused

Katse seeria nr	Õlirõhk süsteemis(bar)	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	2.02	0
1	15.7	3.00	1	2.23	0.21
			3	2.35	0.33
			5	2.37	0.35
2	20.9	4.00	1	2.68	0.66
			3	2.72	0.7
			5	2.73	0.71
3	26.1	5.00	1	3.05	1.03
			3	3.11	1.09
			5	3.13	1.11
4	31.3	6.00	1	3.44	1.42
			3	3.49	1.47
			5	3.51	1.49
5	36.5	7.00	1		-2.02
			3	3.88	1.86
			5	3.89	1.87
6	41.8	8.00	1	4.21	2.19
			3	4.28	2.26
			5	4.30	2.28
7	47.0	9.00	1	4.62	2.6
			3	4.69	2.67
			5	4.73	2.71
8	52.2	10.00	1	5.07	3.05
			3	5.14	3.12
			5	5.17	3.15
9	57.4	11.00	1	5.55	3.53
			3	5.69	3.67
			5	5.74	3.72
10	62.6	12.00	1	6.20	4.18
			3	6.48	4.46
			7	6.69	4.67
			10	6.77	4.75

11	67.9	13.00	1	7.64	5.62
			3	8.31	6.29
			7	8.78	6.76
			10	9.30	7.28

**Joonis 2.1** Staatilise koormuskatse graafik

Katsevai: KV 6 – ühe labaga vai, laba mõõt 100 mm

1. Väändekatse

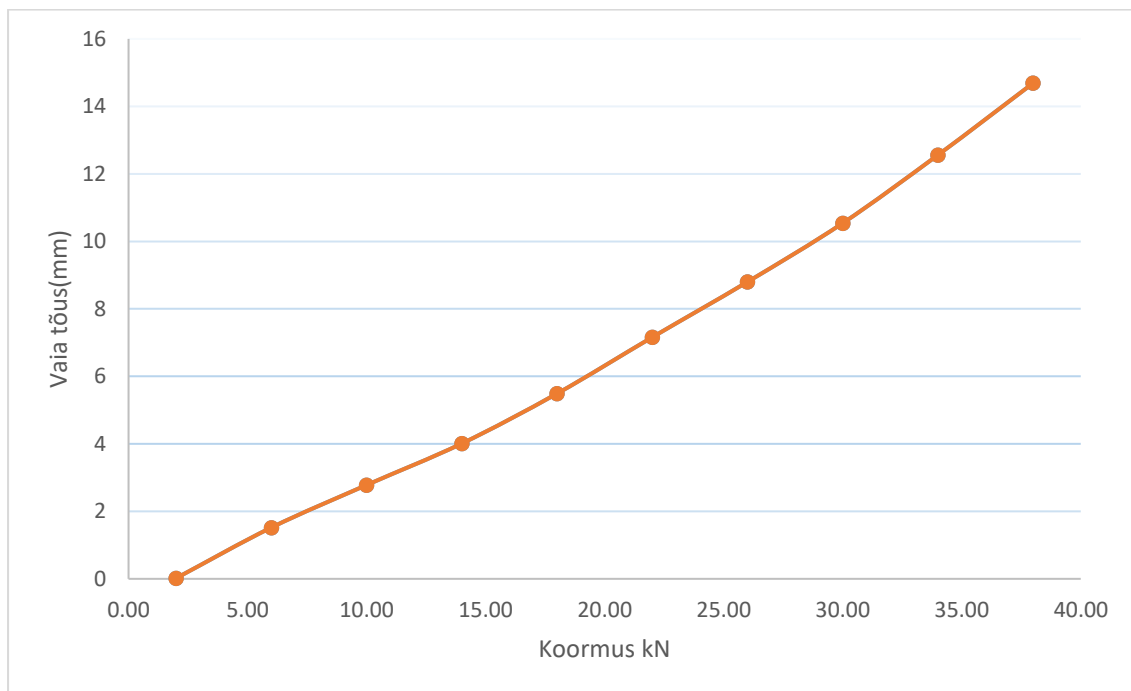
Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

Katse number	Väändevõtme näit Nm	Katsetulemus
1	240	Koormust tõsta
2	250	Positiivne tulemus
3	260	Ei andnud tulemust

2. Staatiline koormuskatse survele

Tabel 2.1 Staatilise survekatse mõõtetulemused

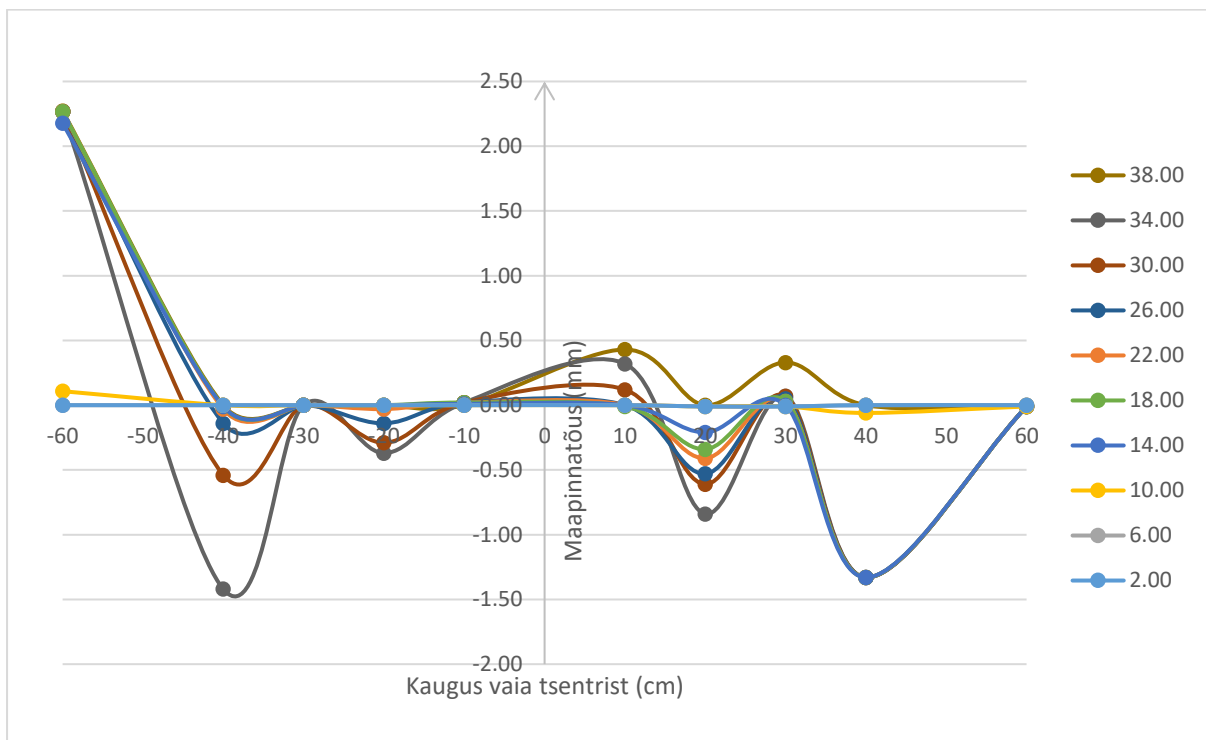
Katse seeria nr	Õlirõhk süsteemis bar	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	115.99	0
1	4.0	2.00	1	116.00	0.01
			3	116.00	0.01
			5	116.01	0.02
2	12.0	6.00	1	117.32	1.33
			3	117.47	1.48
			5	117.51	1.52
3	20.0	10.00	1	118.70	2.71
			3	118.75	2.76
			5	118.77	2.78
4	28.0	14.00	1	119.97	3.98
			3	119.97	3.98
			5	120	4.01
				4.69	
5	36.0	18.00	1	121.2	5.21
			3	121.39	5.4
			5	121.48	5.49
				4.69	
6	44.0	22.00	1	122.87	6.88
			3	123.08	7.09
			5	123.15	7.16
				4.69	
7	52.0	26.00	1	124.44	8.45
			3	124.72	8.73
			5	124.79	8.8
				4.69	
8	60.0	30.00	1	125.99	10
			3	126.38	10.39
			5	126.53	10.54
				4.69	
9	68.0	34.00	1	128	12.01
			3	128.39	12.4
			5	128.55	12.56
				4.69	
10	76.0	38.00	1	129.9	13.91
			3	130.46	14.47
			5	130.68	14.69



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

3. Maapinna tõusu uurimine

Koormusastme number	Koormus (kN)	Maapinna kaugus vaia tsentrist(cm)									
		-60	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40	60
		Maapinna tõus(mm)									
1	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00
2	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00
3	10.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.06	-0.01
4	14.00	2.18	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.21	0.00	-1.33	-0.01
5	18.00	2.27	-0.01	0.00	0.00	0.02	-0.01	-0.34	0.03	-1.33	-0.01
6	22.00	2.27	-0.03	0.00	-0.03	0.02	0.00	-0.41	0.03	-1.33	-0.01
7	26.00	2.27	-0.14	0.00	-0.14	0.02	0.00	-0.53	0.05	-1.33	-0.01
8	30.00	2.27	-0.54	0.00	-0.29	0.02	0.12	-0.61	0.07	-1.33	-0.01
9	34.00	2.27	-1.42	0.00	-0.37	0.02	0.32	-0.84	0.07	-1.33	-0.01
10	38.00	2.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	0.00	0.33	0.00	0.00

**Joonis 3.1** Maapinna tõusu graafik.

Katsevai: KV 7 – kahe labaga vai, laba mõõt 100 mm**1. Väändekatse**

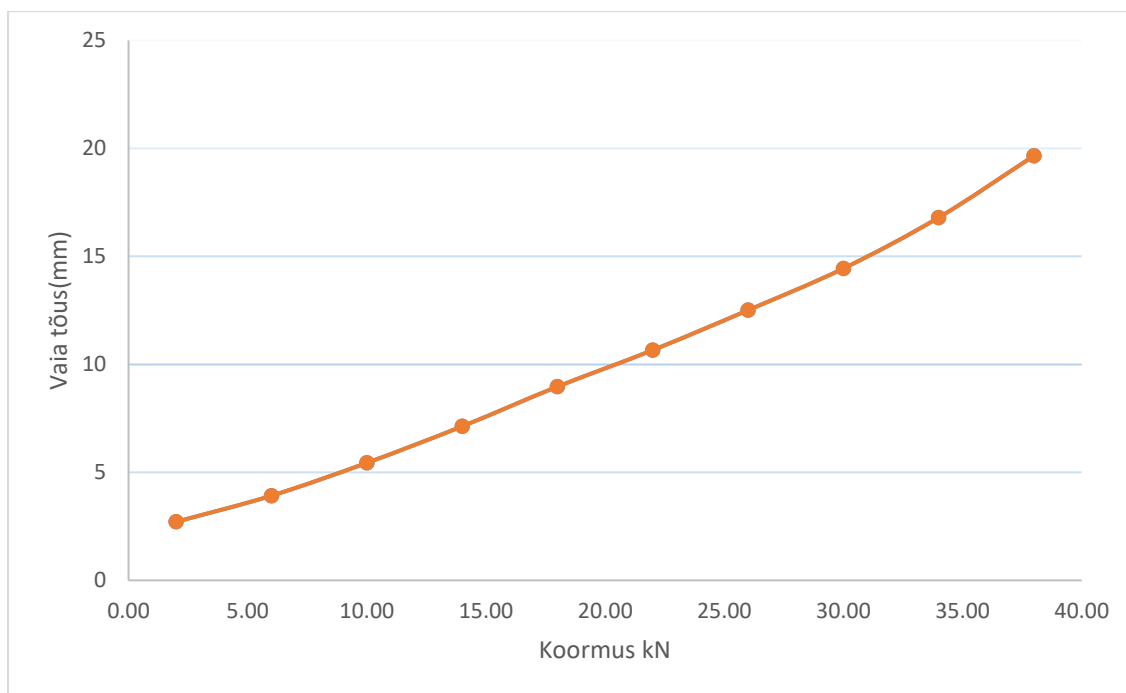
Tabel 1.1 Väändekatse mõõtmised

Katse number	Väändevõtme näit Nm	Katsetulemus
1	240	Koormust tõsta
2	250	Positiivne tulemus
3	260	Ei andnud tulemust

2. Staatileine koormuskatse survele

Tabel 2.1 Staatileise survekatse mõõtetulemused

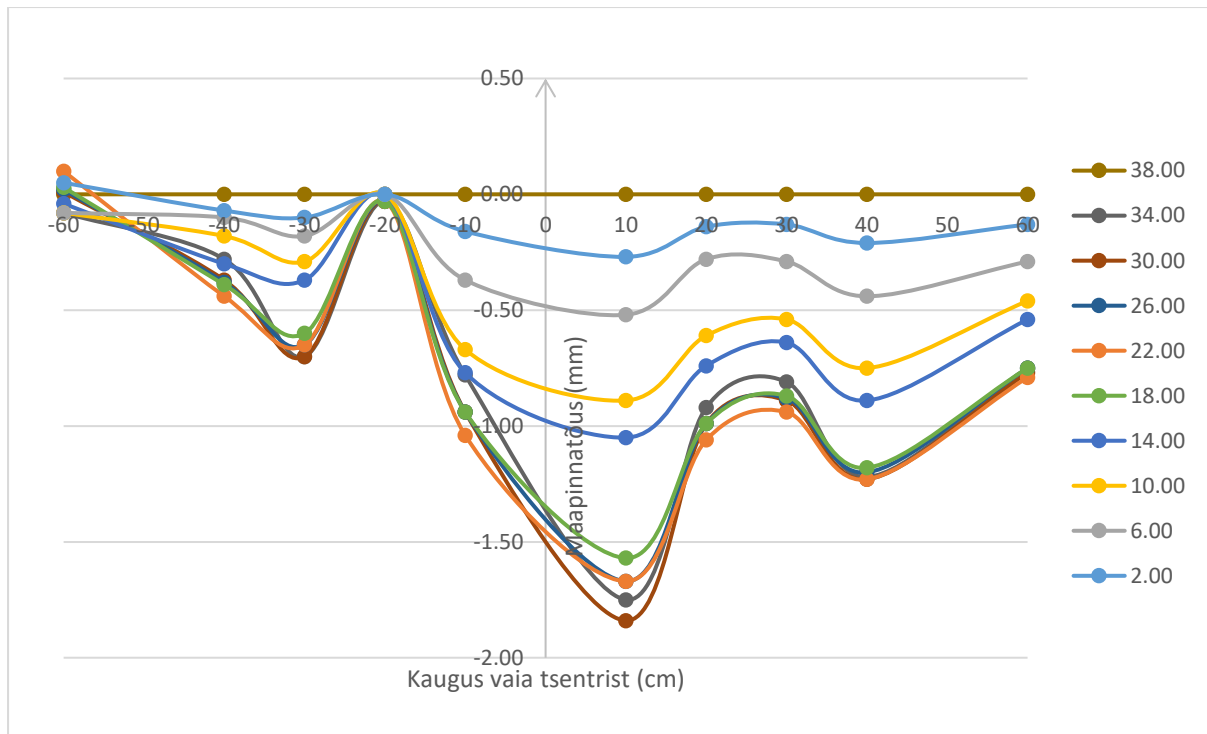
Katse seeria nr	Õlirõhk süsteemis bar	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	96.68	0
1	4.0	2.00	1	99.33	2.65
			3	99.37	2.69
			5	99.39	2.71
2	12.0	6.00	1	100.54	3.86
			3	100.59	3.91
			5	100.60	3.92
3	20.0	10.00	1	102.03	5.35
			3	102.11	5.43
			5	102.12	5.44
4	28.0	14.00	1	103.16	6.48
			3	103.75	7.07
			5	103.81	7.13
5	36.0	18.00	1	105.10	8.42
			3	105.55	8.87
			5	105.65	8.97
6	44.0	22.00	1	106.96	10.28
			3	107.25	10.57
			5	107.34	10.66
7	52.0	26.00	1	108.69	12.01
			3	109.05	12.37
			5	109.19	12.51
8	60.0	30.00	1	110.35	13.67
			3	110.92	14.24
			5	111.12	14.44
9	68.0	34.00	1	112.54	15.86
			3	113.23	16.55
			5	113.48	16.8
10	76.0	38.00	1	115.08	18.4
			3	115.98	19.3
			5	116.34	19.66



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

3. Maapinna tõusu uurimine

Koormusastme number	Koormus (kN)	Maapinna kaugus vaia tsentrist(cm)									
		-60	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40	60
		Maapinna tõus(mm)									
1	2.00	0.05	-0.07	-0.10	0.00	-0.16	-0.27	-0.14	-0.13	-0.21	-0.13
2	6.00	-0.08	-0.10	-0.18	0.00	-0.37	-0.52	-0.28	-0.29	-0.44	-0.29
3	10.00	-0.08	-0.18	-0.29	0.00	-0.67	-0.89	-0.61	-0.54	-0.75	-0.46
4	14.00	-0.04	-0.30	-0.37	0.00	-0.77	-1.05	-0.74	-0.64	-0.89	-0.54
5	18.00	0.03	-0.39	-0.60	-0.03	-0.94	-1.57	-0.99	-0.87	-1.18	-0.75
6	22.00	0.10	-0.44	-0.65	-0.03	-1.04	-1.67	-1.06	-0.94	-1.23	-0.79
7	26.00	0.02	-0.38	-0.65	-0.03	-0.94	-1.67	-0.99	-0.88	-1.20	-0.75
8	30.00	0.01	-0.37	-0.70	-0.03	-0.94	-1.84	-0.99	-0.89	-1.23	-0.77
9	34.00	-0.08	-0.28	-0.70	-0.03	-0.78	-1.75	-0.92	-0.81	-1.22	-0.75
10	38.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Joonis 3.1 Maapinna tõusu graafik.

Katsevai: KV 3 – Vai 25mm**1. Dünaamiline koormustest**

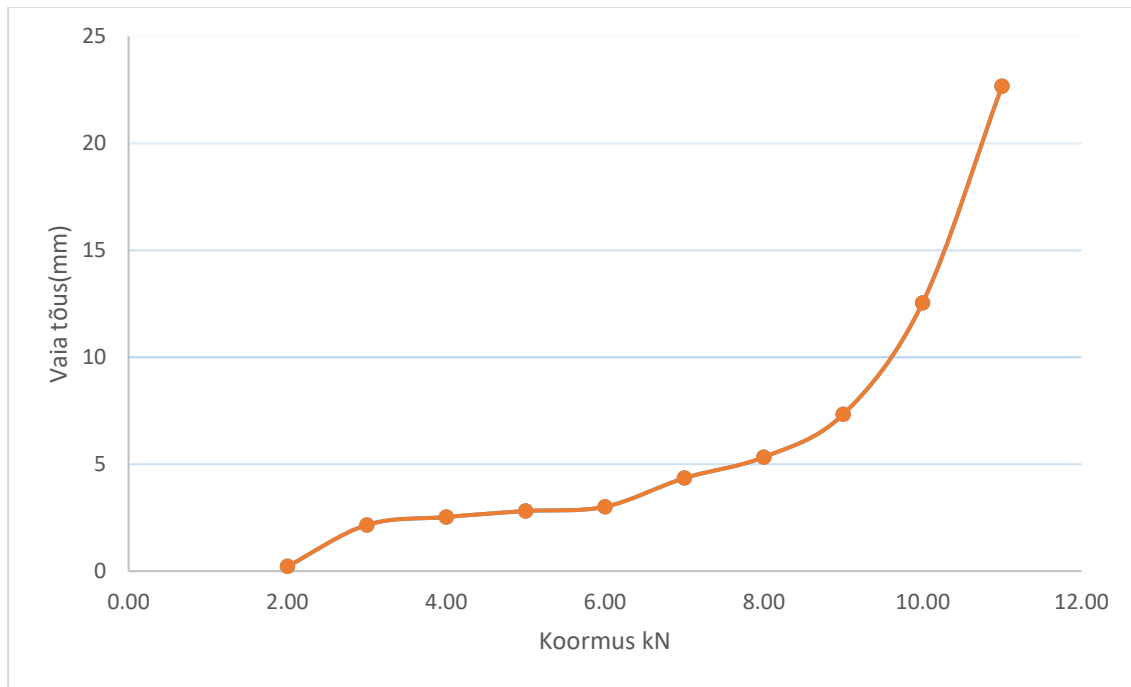
Tabel 1.1 Dünaamilise koormustesti mõõtmised

Katse number	Vaia sügavus pinnases(mm)	Vajum kolme löögi peale(mm)
1	780	24
2	850	23
3	930	20

2. Staatileine koormuskatse survele

Tabel 2.1 Staatilise survekatse mõõtetulemused

Katse seeria nr	Õlirõhk süsteemis bar	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	118.83	0
1	4.0	2.00	1	119.03	0.2
			3	119.05	0.22
			5	119.05	0.22
2	6.0	3.00	1	120.70	1.87
			3	120.99	2.16
			5	120.99	2.16
3	8.0	4.00	1	121.35	2.52
			3	121.36	2.53
			5	121.36	2.53
4	10.0	5.00	1	121.60	2.77
			3	121.64	2.81
			5	121.64	2.81
5	12.0	6.00	1	121.81	2.98
			3	121.83	3
			5	121.84	3.01
6	14.0	7.00	1	121.81	2.98
			3	121.83	3
			5	121.84	3.01
7	16.0	8.00	1	123.93	5.1
			3	124.11	5.28
			5	124.16	5.33
8	18.0	9.00	1	125.15	6.32
			3	125.88	7.05
			5	126.16	7.33
9	20.0	10.00	1	127.35	8.52
			3	130.25	11.42
			5	131.38	12.55
10	22.0	11.00	1	133.49	14.68
			3	138.51	19.68
			5	141.51	22.68



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

Katsevai: KV 2 – Sile vai 25mm**1. Dünaamiline koormustest**

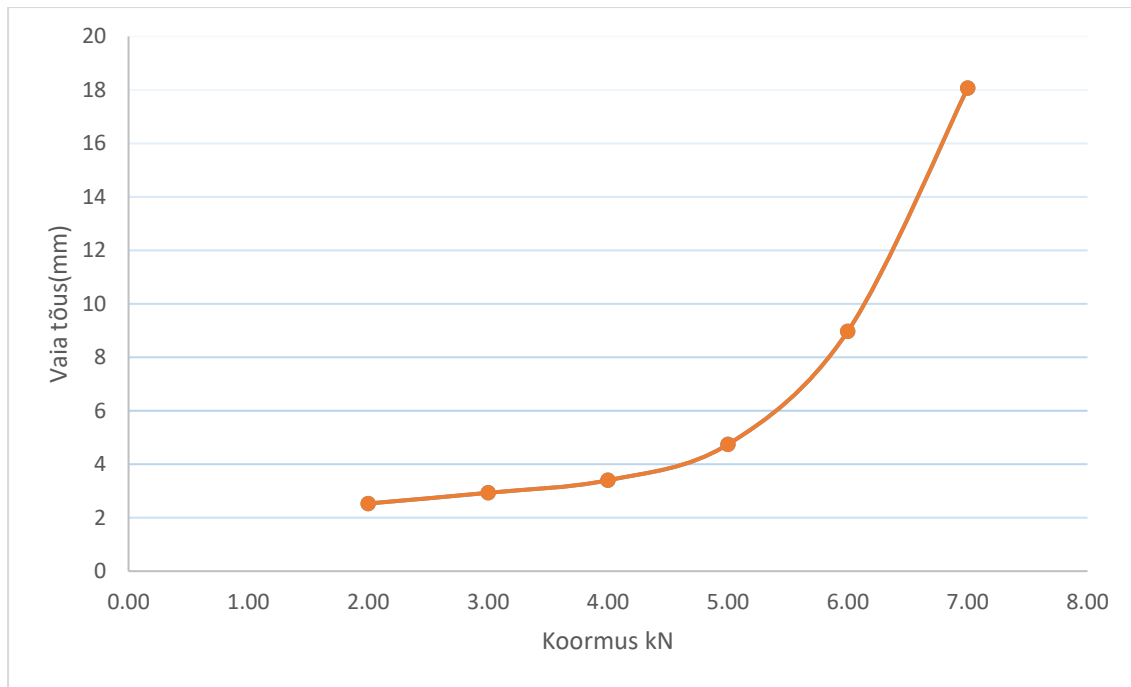
Tabel 1.1 Dünaamilise koormustesti mõõtmised

Katse number	Vaia sügavus pinnases(mm)	Vajum kolme löögi peale(mm)
1	750	26
2	830	21
3	870	19

2. Staatileine koormuskatse survele

Tabel 2.1 Staatileise survekatse mõõtetulemused

Katse seeria nr	Õlirõhk süsteemis bar	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
Algnäit	0.0	0.00	0	104.82	0
1	4.0	2.00	1	106.11	1.29
			3	107.35	2.53
			5	107.35	2.53
2	6.0	3.00	1	107.74	2.92
			3	107.74	2.92
			5	107.75	2.93
3	8.0	4.00	1	108.16	3.34
			3	108.21	3.39
			5	108.22	3.4
4	10.0	5.00	1	109.17	4.35
			3	109.42	4.6
			5	109.56	4.74
5	12.0	6.00	1	110.56	5.74
			3	113.23	8.41
			5	113.79	8.97
6	14.0	7.00	1	115.00	10.18
			3	120.75	15.93
			5	122.89	18.07



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik